

Restvärme för växthusproduktion

Use of Waste Heat for Greenhouse Production

Ulla Nilsson

Sven Nimmermark

Institutionen för Lantbrukets Byggnadsteknik
Department of Rural buildings

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap

Rapport 2013:2

ISSN 1654-5427

ISBN 978-91-87117-32-9

Alnarp 2013



LANDSKAP TRÄDGÅRD JORDBRUK

Rapportserie

Restvärme för växthusproduktion

Use of Waste Heat for Greenhouse Production

Ulla Nilsson

Sven Nimmermark

Institutionen för Lantbrukets Byggnadsteknik

Department of Rural buildings

Sveriges lantbruksuniversitet

Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap

Rapport 2013:2

ISSN 1654-5427

ISBN 978-91-87117-32-9

Alnarp 2013

Förord

I svensk växthusodling används fortfarande stora mängder energi trots att förbrukningen minskat betydligt jämfört med tidigare. I samhället finns stora mängder lågtempererad restvärme från kraftverk och industriella processer som inte utnyttjas idag och ett sätt att utnyttja denna resurs och minska miljöbelastningen från energianvändning kan vara att utnyttja restvärmen i växthusodling eller annan odling.

Projektet ”Restvärme i växthusproduktion” har genomförts som en fortsättning på programmet ”Eden of Sweden” där syftet är att ta tillvara låggradig restvärme från energi- och processindustrin för utnyttjande i lämpliga energisystem.

Framtagning av ny teknik för energihushållning och uppvärmning av växthus, nya energibesparande täckmaterial, förbättrad styr- och reglerteknik samt utveckling av miljövänligare odlingssystem har varit i fokus under arbetet.

Under senare år har forskning och utveckling kring ny, intressant teknik inom dessa områden bedrivits i utlandet, vilken tagits tillvara i denna studie med syfte att implementera detta i svensk trädgårdsnäring.

Projektet har genomförts i samarbete mellan LBT/SLU och Oskarshamns kommun med LBT som projektansvarig. Projektet har finansierats av Partnerskap Alnarp, Oskarshamns kommun och Nova FoU.

Ett varmt tack riktas till alla som bidragit till projektets genomförande. Ett speciellt tack riktas till Birgitta Svensson, Tora Pålsson och Madeleine Uggle som välvilligt delat med sig av foton till rapporten.

Alnarp i december 2012

Ulla Nilsson och Sven Nimmermark

Innehållsförteckning

Sammanfattning	5
Inledning	7
Växternas temperatur- och klimatkrav	8
Klimatförutsättningar för tillväxt och utveckling	8
Ljus.....	8
Temperatur.....	8
Fuktighet.....	8
Koldioxid	9
Dynamisk klimatstyrning anpassad till fotosyntesen	9
Växthuskonstruktioner	10
Växthustyper	10
Grundläggning	11
Täckningsmaterial	11
Ljus.....	14
Värme	16
Rörvärme	18
Varmluftsuppvärmning	19
Gasbrännare	20
Energislag och värmekällor	20
Fossila bränslen – Olja, kol och naturgas	20
Biobränslen - Ved, flis, pellets och torv.....	22
Biogas	23
Rökgaskylning vid panneldning	23
Sol och vind	24
Värmepumpsystem	24
Restvärme som energikälla	25
Ventilation	27
Naturlig ventilation.....	27
Mekanisk ventilation	29
Avfuktning	29
Koldioxid	29
Styrning	29
Energihushållning	30

Ofrivillig ventilation och energi	30
Energivävar och andra isolerskikt för minskad energiåtgång	30
Olika typer av vävar	30
Andra flexibla isolerlösningar	31
Varmflutsuppvärming och röruppvärmning i energihänseende.....	32
Avfuktning och energi	32
Energilagring.....	32
Lågenergiväxthus i Tyskland.....	33
Energibesparingsmöjlighet med tillförsel av restvärme i anslutning till växthusets väggar och tak	36
Lämpliga kulturer för låggradiga energisystem.....	38
Traditionella växthuskulturer för matproduktion	38
Prydnadsväxter, bär och kryddväxter	39
Alger	42
Matsvampar	42
Fiskodling i kombination med växthusodling.....	43
Sammanfattande diskussion	43
Slutsatser	47
Förslag på utformning av forskningsväxthus.....	48
Litteratur	50

Sammanfattning

I svensk växthusodling används fortfarande stora mängder energi trots att förbrukningen minskat betydligt jämfört med tidigare. Energiåtgången för de svenska växthusen uppgick år 2011 till 627 GWh år vilket kan jämföras med 1140 GWh år 1999. Trots en markant övergång till bibränslen och förnybar energi utgör fossila bränslen en betydande andel, 41%, av växthusens energiförsörjning år 2011 och av detta stod olja för 25% och naturgas för 14%.

I samhället finns stora mängder lågtempererad restvärme från kraftverk och industriella processer som inte utnyttjas idag och ett sätt att nyttiggöra denna resurs och minska miljöbelastningen från energianvändning kan vara att använda sig av restvärmen i växthusodling eller annan odling.

Projektet har genomförts med syfte att studera möjligheter, teknik och möjliga produktionssystem för konkurrenskraftig växthusproduktion där spillvärme från industriprocesser utnyttjas för att minska energikostnader och miljöstörningar. Ett speciellt fokus har varit att studera möjligheterna att utnyttja restvärme från Oskarshamns kärnkraftverk.

Odling i teknologiskt avancerade växthus ställer stora krav på klimatet för att odlingen skall vara produktiv och lönsam. För god kvalitet och avkastning i en växthuskultur behöver klimatförhållanden vara anpassade till behoven hos den kulturväxt som odlas. Tillväxt och utveckling styrs av balansen mellan ljus, temperatur, luftfuktighet och tillgång på koldioxid. Olika kulturer har olika temperaturkrav och en viss minimitemperatur krävs såväl dag som natt för att optimera fotosyntesen. Dock kan man tillämpa en s.k. *dynamisk, ljusanpassad klimatstyrning* med högre dagtemperatur och lite lägre nattemperatur där energiförbrukningen kan reduceras och lågtempererad restvärme kan utnyttjas på ett bättre sätt.

De nya växthus som byggs i Sverige är huvudsakligen av typen Venlo med sammanbyggda sektioner som kan bilda kvadratiska anläggningar med stora rationella ytor. I dessa reduceras energiförbrukningen jämfört med traditionella breda fristående växthus till följd av formen och användning av vävar som dras för nattetid. En avancerad styr- och reglerteknik minskar också behovet. Dessa växthus täcks vanligen av enkelglas med god ljustransmission som på ett bra sätt tillgodoser växternas ljusbehov. Även akrylplast och polykarbonat i form av dubbelskiktade plattor används frekvent och då speciellt i växthusens sidor. Ett intressant nytt dubbelskiktat material med sick-sack-profilerad yta (Lexan® ZigZag™) kombinerar god ljusgenomgång med lite bättre isolerande förmåga. För odling som inte har samma krav på klimatet används enkla bågväxthus oftast försedda med en enkel plastfolie som täckmaterial.

I konventionell svensk växthusodling sker uppvärmningen med rörvärme och systemen är oftast dimensionerade för hög framlednings/returtemperatur (80/60 eller högre). För utnyttjande av restvärme med låga temperaturer krävs andra system, exempelvis luftvärme, där kraven på framledningstemperatur och temperaturdifferens är lägre. I USA byggdes en rad anläggningar för studier av utnyttjande av lågtempererad värme vid energikrisen på 1970- och 1980-talet och även en anläggning för utnyttjande av restvärme från ett kärnkraftverk, Browns Ferry kärnkraftverk i närheten av Athens i Alabama, byggdes. Restvärmen från kärnkraftverkets kylvatten höll en temperatur som när vattnet nådde växthuset var så låg som 14-21°C i januari. De anläggningar som byggdes utnyttjade stora värmeöverförande ytor mellan restvärmen och systemen i växthusen. I många fall användes fläktkonvektorer / fläktluftvärmare i dessa anläggningar och för anläggningen för utnyttjande av restvärmen från

kärnkraftverket användes ett system där restvärmen i form av värmevatten utan värmeväxling tillfördes växthuset via befuktarblock och eftervärmning med värmebatterier. Direkttillförsel av restvärmen i form av vatten gav en mycket god värmeöverföring, men luftfuktigheten blev mycket hög vilket orsakade problem. De anläggningar för utnyttjande av restvärme i växthusproduktion som byggdes i USA under den aktuella tidsperioden var i drift ett antal år, men enligt uppgift fanns inget större kommersiellt intresse. Det kommersiella intresset är förstas knutet till de ekonomiska förutsättningar som gäller lokalt och för aktuell tid. De studier som gjordes under 1970-1980-talen resulterade inte i någon kommersiell odling knuten till låggradig energi från kärnkraftverk och de försöksväxthus som fanns, t.ex. i Athens, finns inte längre.

I studier på Alnarp på 1980-talet odlades jordgubbar med olika plasttäckning i mark som värmdes upp med rörslingor med en vattentemperatur på 20°C och 30°C. Uppvärmningen av marken resulterade i tidigare skörd främst för jordgubbar som odlades i plasttäckad mark eller i plasttunnel. Enbart uppvärmning utan täckning gav bara några få dagars tidigare skörd.

Utnyttjande av restvärme för reducerad energikostnad måste ställas mot andra alternativa energikällor och andra energibesparande åtgärder. Växthusföretag letar aktivt efter alternativa energikällor och exempelvis skogsråvaror såsom flis, bark och spån, liksom flis från återvinning av från träavfall och sågspån är värmekällor som kan utnyttjas. Också ökad isolering ger reducerad värmeåtgång. Som alternativ till energibesparande vävar har studier gjorts med icke konventionella energibesparande åtgärder såsom isolering av växthus nattetid med polystyrenpellets som blåses in i växthusets skal och också med skum som har en isolerande förmåga. I försöken har pellets och skum tagits bort dagtid för att inte reducera ljusinsläppet.

I Tyskland studeras lågenergiväxthus i ett speciellt ZINEG-projekt. I ett av dessa växthus studeras ett stängt växthuskoncept med solkollektorer, värmepump och energilager. Intressant är att skörden i detta växthus varit högre än i ett kontrollväxthus med mer ljus.

Efter att ett djupvattenintag börjat utnyttjas för kärnkraftverket i Oskarshamn uppgår utgående kylvattentemperaturer enligt uppgift till beskedliga ca 11 °C som lägst vintertid och ca 21°C som högst. En möjlighet att utnyttja låggradig värme är att tillföra denna i anslutning till växthusets täckmaterial i en spalt mellan en väv och täckmaterial. I ett sådant system kan transmissionsförlusterna reduceras i de fall utetemperaturen är lägre än det som kan åstadkommas med restvärmen. Beräkningar tyder dock på att besparingarna blir små i konventionell växthusodling av traditionella växter för matproduktion med de låga temperaturer som finns att tillgå vid utnyttjande av djupvattenintaget. I detta fall är andra kulturer såsom bärödling, snittblommor och svampodling där lägre temperaturer kan accepteras klart intressantare. Om temperaturen på restvärmen är bara ca 5°C högre finns väldigt mycket bättre förutsättningar till god energibesparing.

Det finns i dagsläget ett behov av att utveckla teknik för växthusodling med utnyttjande av låggradig restvärme. I en forskningsanläggning skulle sådan teknik liksom kombinationen fiskodling-växthusodling kunna studeras.

Inledning

Projektet ”Restvärme i växthusproduktion” har genomförts som en fortsättning på programmet ”Eden of Sweden” där syftet är att ta tillvara låggradig restvärme från energi- och processindustrin för utnyttjande i lämpliga energisystem. Huvudintressenter i programmet är Oskarshamns kommun, Nova FoU, Oskarshamn.

Det övergripande syftet med det aktuella växthusprojektet finansierat av Oskarshamns kommun, Nova FoU och SLU via Partnerskap Alnarp är att studera möjligheter och utveckla teknik och produktionssystem för konkurrenskraftig växthusproduktion där spillvärme från industri-processer utnyttjas för att minska energikostnader och miljöstörningar.

Framtagning av ny teknik för energihushållning och uppvärmning av växthus, nya energibesparande täckmaterial, förbättrad styr- och reglerteknik samt utveckling av miljövänligare odlingssystem har varit i fokus under arbetet.

Under senare år har forskning och utveckling kring ny, intressant teknik inom dessa områden bedrivits i utlandet, vilken tagits tillvara i denna studie med syfte att implementera detta i svensk trädgårdsnäring.

Målet för projektet har varit att:

- 1) Sammanställa nuvarande kunskapsläge
- 2) Identifiera kunskapsluckor som kan vara aktuella att utforska i kommande samarbete mellan SLU och Oskarshamn
- 3) Utarbeta handlingsplan för fortsatt utvecklingsarbete rörande tekniker och odlingssystem
- 4) Utforma förslag till en pilotanläggning där innovativ teknik testas
- 5) Beskriva och planera framtida projektverksamhet.

Projektet har genomförts i samarbete mellan LBT/SLU och Oskarshamns kommun med LBT som projektansvarig.

Följande delar har ingått i projektet:

- 1) Inventering av befintlig teknik som kan användas för att utnyttja restvärme i växthusodling
- 2) Inventera möjliga nationella och internationella samarbetspartners
- 3) Tillsammans med branschföreträdare ta fram underlag för etablering av en pilotanläggning i Oskarshamns kommun
- 4) Utarbeta handlingsplan, inklusive översiktlig beskrivning av en pilotanläggning i kommersiell skala, för fortsatt arbete inom området.

Växternas temperatur- och klimatkrav

Klimatförutsättningar för tillväxt och utveckling

Den ljusberoende fotosyntesen, den process i vilken koldioxid assimileras, bestämmer växtens tillväxt och utveckling. Ljusets intensitet och våglängd påverkar hur växten tillväxer tillsammans med temperatur och tillgång på koldioxid. För god kvalitet och avkastning i en växthuskultur behöver klimatförhållandena vara anpassade till behoven hos den kulturväxt som odlas.

Vad som är ett optimalt växthusklimat varierar över tiden beroende på i vilket stadium växten befinner sig. Tillväxt och utveckling styrs av balansen mellan ljus, temperatur, luftfuktighet och tillgång på koldioxid. Denna balans ser olika ut beroende på vilken typ av utveckling som ska gynnas, t.ex. rotutveckling, tillväxtpunkter eller nya klasar och fruktutveckling.

Ljus

Ljuset är oftast den begränsande tillväxtfaktorn vid odling på nordliga breddgrader. Vid låg tillgång på ljus sker tillväxten långsamt. Eftersom man i växthusproduktion försöker optimera tillväxten tillförs artificiellt ljus när det naturliga ljuset inte räcker till för att skapa optimala ljusförhållanden.

Dagslängden är också av betydelse för många växters utveckling och artificiell belysning kan behövas även för detta ändamål (se vidare under ljusavsnitt längre fram).

Temperatur

En viss minimitemperatur krävs såväl dag som natt för att optimera den fotosyntetiska processen. Dagtid behövs värmeenergin för att assimilationen ska äga rum i växten medan det på natten krävs en viss värmeenergi för att den under dagen assimilerade energin ska kunna syntetiseras i växten. I växthusodling eftersträvas därför ofta en optimering av temperaturförhållandena över dygnet för att få önskad tillväxt och utveckling hos växten.

Fuktighet

Växten behöver ha tillgång till vatten för sin tillväxt och också fuktighetsnivån i luften har stor betydelse. Den relativa luftfuktigheten (RF) i växthuset får inte vara alltför hög eller låg då detta påverkar växten negativt. Vid en hög relativ luftfuktighet minskar transporten av vatten och näringsämnen i växten pga. den lilla skillnaden i ångtryck mellan omgivningen och växten, och processerna i växten saktas ned. En hög relativ luftfuktighet kan också innebära att vattenångan i luften kondenserar på växterna vilket leder till ökad risk för svampangrepp. Det vanligaste sättet att avfukta luften är att ventilerar ut fuktig luft och få in torrare utomhusluft (se avsnitt om Ventilation) men det förekommer också att avfuktning av luften sker med hjälp av luftavfuktare i växthuset. Installation av luftavfuktare är en relativt kostsam investering men det kan löna sig på sikt beroende på energipriser och hur systemet utformas.

Vid låg relativ fuktighet blir skillnaden i ångtryck stor, vilket kan orsaka vattenstress i växten som leder till försämrad tillväxt i form av t.ex. mindre blad och minskad sträckningstillväxt och fruktsättning. I växthus strävar man efter att hålla den relativa fuktigheten mellan 70 och

85% för att gynna växternas behov. För t.ex. tomatplantor uppstår vattenstress när luftens fuktighet understiger 70% (SJV, 2007a).

Koldioxid

Koldioxid utnyttjas av växten då det i fotosyntesen bildas glukos vilket gör att tillgång på ljus behöver balanseras med en motsvarande koldioxidhalt i luften för att optimera användningen av det fotosyntetiska ljuset.

I växthusodling söker man optimera halten genom att tillföra koldioxid på olika sätt (se avsnitt om Koldioxid under rubriken Ventilation).

Dynamisk klimatstyrning anpassad till fotosyntesen

Ett sätt att använda sig av kunskapen om vad som gynnar olika processer och om balansen mellan de olika tillväxtfaktorerna är s.k. *dynamisk, ljusanpassad klimatstyrning*. I Danmark används begreppet *Intelligrow* för den typen av klimatstyrning och styrningen är mycket vanlig i dansk växthusproduktion (Ottosen & Rosenqvist, 2004). Även i Sverige är dynamisk ljusanpassad klimatstyrning vanlig. Intelligrow-modellen går ut på att optimera förhållandet mellan ljus, koldioxid och värme för *optimerad fotosyntes*. Fotosyntesen är lägre vid låg instrålning så både temperatur och koldioxidkoncentration kan hållas lägre för att anpassas till den lägre fotosyntesaktiviteten i plantorna. Vid ökat ljus ökas temperatur och koldioxidhalt i växthuset. Förutom optimering av fotosyntesen är målet även att minska energianvändningen samtidigt som förhållandena för växten optimeras utifrån nämnda tillväxtfaktorer. Växthusets tekniska utrustning som vävar, ventilation, uppvärmning och utrustning för tillsats av koldioxid, används för att reglera klimatet så att det anpassas till växtens behov med avseende på temperatur, ljus, fuktighet och koldioxidhalt i luft och vid plantorna. Som exempel kan nämnas att studier med krukosor och användning av dynamisk ljusanpassad klimatstyrning har visat på energibesparingar på 32-43%, beroende på när på våren kulturen startades, räknat på energi använd både för uppvärmning och för belysning (Ottosen & Rosenqvist, 2004).

Genom att enbart styra temperaturen på ett intelligent sätt menar man att det i jämförelse med konventionell temperaturstyrning finns möjlighet att spara 20% av energiförbrukningen i prydnadsväxtodling (Christensen & Larsson, 2010). Vid sådan intelligent styrning av temperaturen tillåts den vara högre dagtid då det är hög solinstrålning medan nattetemperaturen kan tillåtas gå ner lägre än vid traditionell styrning. Detta innebär att mindre mängd energi åtgår för att värma växthuset. Dygn med lägre medeltemperatur och instrålning kan kompenseras tillväxtmässigt av efterföljande dygn med högre temperatur och instrålning. På så sätt erhålls lika snabb utveckling över en längre period (integrerad temperaturstyrning). Förutsättningen för god utveckling av växterna är att temperaturen i växthuset inte överstiger maximal temperatur eller sjunker under den minimitemperatur som växten tål utan att få stressreaktioner som försämrar utbytet av t.ex. kvalitet och hur snabbt växtkulturen utvecklas. Att kunna styra utvecklingen är viktigt för producenten som vill kunna beräkna skörde- och försäljningstid för sina produkter.

Traditionellt är dagtemperaturen högre än nattetemperaturen för att balansera och utnyttja tillgången på ljus och värme som är högst mitt på dagen. Det finns dock metoder där man med syfte att påverka växternas utveckling och tillväxt ändrar på detta. I till exempel ekologisk

krukväxtodling används s.k. negativ DIF (dagtemperatur lägre än nattemperatur; med DIF menas temperaturskillnad mellan dag och natt). Målet är att styra sträckningstillväxten så att den minskar och särskilt används detta för växter från tempererade zoner (SJV, 2008b). Temperaturen kan då sänkas ned mot 15°C dagtid.

Växthuskonstruktioner

Växthustyper

Det finns tre huvudtyper av växthuskonstruktioner som används i svensk växthusproduktion:

- Breda fristående och fribärande hus som ofta är raka i sidorna och har sadeltak men som också kan vara uppförda som båghus. Stommen består vanligen av galvaniserat stål eller aluminium. Aluminium används i profiler som spröjsar. Ofta används en fackverkskonstruktion i takstolen eller bågkonstruktion för att hålla nere materialåtgång, vikt och skymmande (skuggning) av solljus.
- Venloblock med pelare placerade inuti blocket kan beskrivas som sammanbyggda växthus utan mellanväggar. Konstruktionen blir kompakt och tar mindre plats än de fristående husen. Venloblock är vanligast i södra Sverige men de kan vara mindre lämpliga i snörika trakter där snön riskerar att byggas mellan taknockarna och ge problem med hög snölast. Täckmaterialet utgörs ofta av glas.
- Båghus eller tunnlar av plast kan vara både enkla och mer avancerade i utförande. De största båghusen kan jämföras med fristående växthus med sadeltak och har även samma typ av ventilation. Stommen kan vara av stål, aluminium eller limträbalkar. Täckmaterialet kan bestå av halvhårda skivor, folie eller dubbelfolie. Båghus i form av plasttunnlar är en enkel och billig konstruktion som passar bra till säsongsproduktion av växter som t.ex. utplanteringsväxter eller till odling av jordgubbar eller hallon. Ventilation åstadkoms ofta med fläktsystem eller genom att gavlarna är öppningsbara. Båghus av limträ ger stor fri luftvolym och det är enkelt att installera vävar, belysning, transportbanor etc. i huset. Nackdelen med limträbågar är att de skymmer (skuggar) mer än t.ex. stål- och aluminiumstommar vilket är till nackdel speciellt vintertid då den låga ljusinstrålningen är en begränsande faktor.

I Sverige är enkelglas som täckmaterial fortfarande vanligast följt av växthus med flerskiktsmaterial i väggarna och enkelglas i taket. Endast 9% eller 288 000 m² är ouppvärmad areal och förekommer på hela eller delar av växthusytan i 340 företag. Uppvärmad areal är 2 370 000 m² (Christensen & Larsson, 2010; SJV, 2012b).



Figur 1. Interiör från ett Venlo-växthus med en prydnadsväxtkultur (Foto: Sven Nimmermark).

Grundläggning

Grunden i växthuset ska vara lätt att förändra för att kunna anpassa växthuset till nya omständigheter. En lätt och smidig konstruktion är därför bra (SJV, 2007b). Utöver detta bör grundläggningen anpassas till vad den geotekniska undersökningen visar när det gäller markens egenskaper (sättningsrisk, bärförmåga, behov av fyllning för stabilitet, jordtryck och tjälfarlighet) samt till eventuella erfarenheter från växthusodling på platsen. Växthusets grund/grundläggning kan utformas efter olika principer; med helgjuten mur, med plintar vilket är den vanligaste formen eller som platta på mark.

Av energihushållningsskäl är det viktigt att isolera grunden. Förutom en lägre energiförbrukning ger isolering av grunden också ett bättre växtklimat närmast väggen (SJV, 2007b) där det annars kan bli en lägre temperatur jämfört med övriga växthusytor. Isoleringen av grunden är speciellt viktig när odling sker på marken. Den isolerade grunden minskar utläckage av värme från växthusets golv/jordmassan under växthuset som då bättre verkar som ett värmelager för ackumulerad värme från solinstrålning och värmesystem.

Täckmaterial

Glas är det vanligaste täckmaterialet i svenska växthus. Orsaken torde vara att det både ligger lägre i pris än de olika plastplattorna och har lång hållbarhet. Att föredra är glas av typen

flytplansglas vilket har en ljustransmission på ca 90% av ljuset medan glas som tillverkats genom dragning kan ha en betydligt lägre ljusgenomsläpplighet (SJV, 2007b). Fördelen med glas är att det åldras mycket lite och därför behåller sina egenskaper över tid.

Plastmaterial av olika typ används också som täckmaterial. Täckmaterialet kan då bestå av t.ex. polykarbonat, akryl och polyetenfolie i olika utföranden.

En sammanställning av olika förekommande täckmaterials ljusgenomsläpplighet återfinns i Tabell 1 och över materialens värmegenomgångskoefficient i Tabell 2.



Figur 2. Växthus med täckmaterial av glas. Glas i både väggar och tak är vanligt förekommande. Kombinationen tvåskiktspplast i väggar och glas i tak är också vanlig (Foto Sven Nimmermark).

Tabell 1. Vanligt förekommande täckmaterial och deras ljusgenomsläpplighet (Nimmermark, 1992; SJV, 2007b; Wigström, 1992)

Täckmaterial i ytterskal	Ljusgenomsläpplighet, %	Anmärkningar
Enkelglas 4 mm	90-91	Beständigt
Dubbelglas 4 mm	81-82	Beständigt
PVC	72-80 (efter 8 år ca.60)	Åldringen är beroende av bl.a. UV-skyddets kvalitet. Slagtåligt material
Polyester-plattor	79-80 (efter 4 år 67)	
Polykarbonatplattor 4-16 mm	70	Åldring förhindras genom ytterskikt i akryl. Passar mindre ljuskrävande kulturer. God slagtålighet, böjligt och lämpligt i bågkonstruktioner, motståndskraftig mot brand
Akryl 16 mm (plexiglas)	79-82 (obetydlig åldring under 8 år)	Beständigt Spröd vid slag
Akryl 32 mm	74	Beständigt
PE-folie (polyeten) 0,2 mm	86 (efter 5 år 80)	Beständig för UV-stabiliserade folier
Dubbel PE-folie 0,2 mm	74 (efter 5 år 64)	Beständig för UV-stabiliserade folier

Det lägre U-värdet hos de dubbla materialen leder till mindre energiåtgång men de har också en lägre ljusgenomsläpplighet och innebär därför sämre förutsättningar för fotosyntesen och tillväxten (Tabell 1 och 2).

Enkla täckmaterial har som synes av tabellen en mycket hög värmegenomgång varför olika dubbla varianter på materialen används i framförallt växthusväggar i energibesparande syfte. Dubbelglas och plast med fler än ett skikt använder sig av en isolerande luftspalt mellan skikten med målet att minska energiläckaget ur växthuset jämfört med enkelskiktade täckmaterial.

Tabell 2. Sammanställning av vanligt förekommande täckmaterials värmegenomgångstal (U-värden) från olika studier (Landgren, 1984; Nimmermark, 1992; Tantau, 1976)

Material	U-värde, $W m^{-2} K$	Anmärkning
Enkelfolie	7-10	Enl. Tantau 1976
Dubbelfolie	5,5-7,3	Enl. Tantau 1976
Enkelglas	6,2-7,5	Enl. Tantau 1976
Dubbelglas	4,0-4,6	4,0 enl. Landgren 1984 4,1-4,6 enl. Tantau 1976
Akrylplast, 3-skikt, 32mm	1,7	Enl. Landgren 1984
Akrylplast, dubbelskikt	2,2-2,5	Enl. Landgren 1984
Korrugerad platta	7-19	Beräknat med inre och yttre övergångstal 7-20 $W m^{-2} K$ resp. 20-40 $W m^{-2} K$, materialets värmemotstånd 0,007 $m^2 K W^{-1}$ och ytförstoring 40-55%

När det gäller livslängden för plattor av PVC, polyester och polykarbonat kan åldring av materialet göra att de behöver bytas ut snabbare än glas. Särskilt gällde detta tidigare än 1990 då en del folier och plattor tillverkades utan skyddande skikt mot solens UV-strålning vilket gjorde att de snabbt åldrades och ljusgenomsläppligheten minskade (Gustavsson & Åström, 1986; Nimmermark, 1992; SJV, 2007b). När det gäller t.ex. PVC-plattor är de idag belagda med akryl för att öka motståndskraften mot UV-ljus.

Plastfolier är det billigaste täckmaterialet. I de flesta fall tillverkas de med inblandning av etenvinylacetet (EVA) i ett treskiktat material med EVA-skiktet i mitten, vilket ger god UV-beständighet och ljusgenomsläpplighet på 85-90% för ny folie och 80% efter 5 år (förväntad UV-beständighet på plastfolier 5-8 år). Folien i sig är stark och klarar av att hålla snölast och vind, ofta bättre än själva bågkonstruktionen. Vid åldring försämras dock hållfastheten vilket är orsaken till att de behöver bytas.

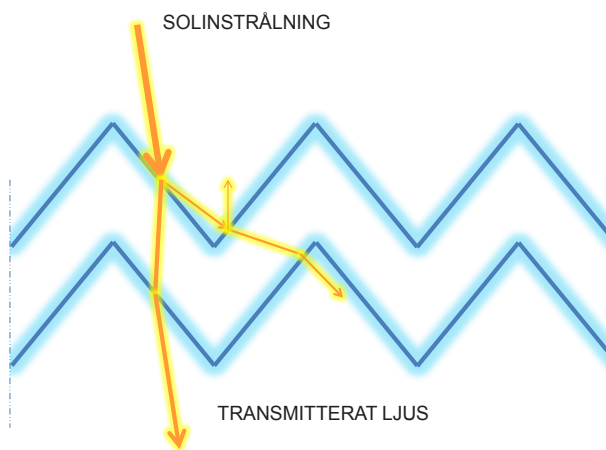
Akrylplattor i utformning som kanalplattor med tjocklekarna 16-32 mm används som täckmaterial med två eller tre skikt. Akryl har fördelen att inte förändras vid åldring och har därför god ljusgenomsläpplighet och isoleringsförmåga över tiden. Det förekommer att äldre akrylplattor sprack men på senare år har detta inte förekommit i någon större utsträckning. Däremot är de spröda och lätt antändbara så de bör undvikas på ställen där det finns risk för att de blir utsatta för åverkan och brand (SJV, 2007b).

Polykarbonatplattor har goda hållfasthetsegenskaper, de är böjliga och har god motståndskraft mot slag (god slagseghet). Jämfört med akrylplattor är dock ljustransmissionen sämre för polykarbonatplattorna (Nimmermark, 1992).

På senare år har ett intressant täckmaterial av polykarbonat med goda egenskaper för både ljusgenomsläpplighet och värmegenomgång tagits fram (Sonneveld & Swinkels, 2005). Materialet som säljs av GE-plastics (Bergen op Zoom, Nederländerna) är uppbyggt i två skikt liksom traditionella plana kanalplattor, men har till skillnad från dessa en sicksackformad yta och benämns Lexan® ZigZag™. Materialet uppges ha en transmission av direkt ljus på 90,9% (högre än glas) och ett U-värde på 2,7 W/m²K (GE Plastics, 2012; Sonneveld & Swinkels, 2005). Den goda ljustransmissionen kan förklaras av materialets utformning (se Figur 3)

Ljus

Eftersom ljustillgången är en begränsande faktor i odling på våra nordliga breddgrader är det särskilt viktigt att ta vara på det ljus som finns naturligt och komplettera eller i vissa fall helt ersätta det naturliga ljuset med artificiellt ljus för att uppfylla ljuskraven hos de växter som ska produceras i växthuset. Det ljus som används av växterna vid fotosyntesen sammanfaller ganska väl med det synliga ljuset. Växthuskonstruktionen kan reducera ljusinsläppet på olika sätt. Glas som täckmaterial reducerar ca 10% av uteljuset, kondens ca 5%, smuts upp till ca 10% och själva konstruktionen med utrustning så mycket som 20% (Christensson, 1988; Nimmermark, 1992). Det lönar sig därför att hålla täckmaterialet rent och minimera skrymmande detaljer i konstruktion och/eller utrustning.



Figur 3. Tvärsnitt med principiellt skisserad ljusgenomgång i ett sicksackformat täckmaterial av typen Lexan® ZigZag™

Energihushållning står ofta i motsats till hög ljusinstrålning då olika energibesparingsmetoder ofta innebär sänkning av instrålning av naturligt ljus i växthuset. Under tidpunkter och perioder med stor solinstrålning behöver växthuset skuggas för att skydda växterna. En tidigt använd metod för detta var kalkning av täckmaterialet och som då skuggade även de timmar när det fanns behov av en högre instrålning ur både växt- och energihushållningssynpunkt. Kalkning har idag ersatts av skuggvävar som dras för och ifrån alltefter behov. Förutom skuggning ger skuggvävar också en energibesparande effekt. Det finns olika typer av vävar som växthusodlaren väljer utefter behov, t.ex. vad som passar aktuellt växthus och kulturväxts behov (skuggvävar, energivävar, mörkläggningsvävar). Ibland finns mer än en typ av väv installerad i samma växthus och de kan användas samtidigt eller var för sig. Skuggvävarna styrs med avseende på solinstrålning med hjälp av givare som mäter instrålningen och en styrutrustning som ändrar vävarnas läge (fördragna/fråndragna) efter instrålningsnivån. Styrningen görs med en viss fördröjning för att hindra att vävarna går till och från alltför ofta. Vävar för mörkläggnings är ofta styrda av tidur då man önskar mörklägga växtkulturen ett visst antal timmar per dygn. Dessa ger också energibesparande effekt. Vävar på olika sidor i växthuset kan styras separat så att det blir lättare att uppnå samma temperatur i hela växthuset.

För tillskottsbelysning i växthus används främst högtrycksnatriumlampor som kan ge 1500-6300 lux, men lampor av typen LED (Light Emitting Diode) som är ett energisnålare alternativ är på väg att börja användas i viss utsträckning. Sådan tillskottsbelysning räcker för att få fotosyntetisk belysning av växterna, men i jämförelse med solljuset är denna ljusstyrka betydligt svagare. Det naturliga solljuset som kan leverera över 100 000 lux en solig

sommardag är vintertid betydligt mindre men ändå i storleksordningen 20 000 lux (Lindström, 2007).

Starkare ljus (belysning) används vid uppdrivning av småplantor och ofta då bara på den begränsade yta där plantorna drivs. För långdagsbehandling räcker lägre intensiteter. I skogsplantskolor används t.ex. för dagsförlängning i granodling 300 lux (Lindström, 2007). LED-lampor är intressanta, men fortfarande finns frågetecken om användbarheten i olika applikationer. Studier med LED-belysning i kortdagsväxter (*Chrysanthemum*, *Kalanchoe* och *Julstjärna* som fick 8 timmar dagsljus och 8 timmars belysning med LED-ljus) visade på utebliven blomning med färgerna vitt, gult, rött och grönt ljus medan blått ljus inte stoppade blomningen hos alla plantor. Belysningsintensiteten var i dessa försök 240-2200 lux (6-39 $\mu\text{M}/\text{m}^2\text{s}$) (Schüssler & Bergstrand, 2009).

LED till belysning har studerats i försök med behandling av kortdagsväxter där LED-ljus av olika färg belyste salladskott av ärtor och solrosor. Studien visade att olika färger gav olika tillväxt och friskvikt hos skotten. LED-tekniken har stora möjligheter i växtodlingssammanhang genom att ljusets sammansättning kan styras med hjälp av lysdioder med som olika färg som kombineras till ett kluster och kan ställas in så att ett specifikt spektrum erhålls för aktuell växt och situation. Armaturerna för assimilationsbelysning är dock ännu för kostsamma för att de ska vara kommersiellt intressanta. Ytterligare utveckling av tekniken och forskning kring hur växterna påverkas av olika ljus behövs för att tekniken i framtiden ska bli aktuell i växthusproduktion (Schüssler & Bergstrand, 2009).

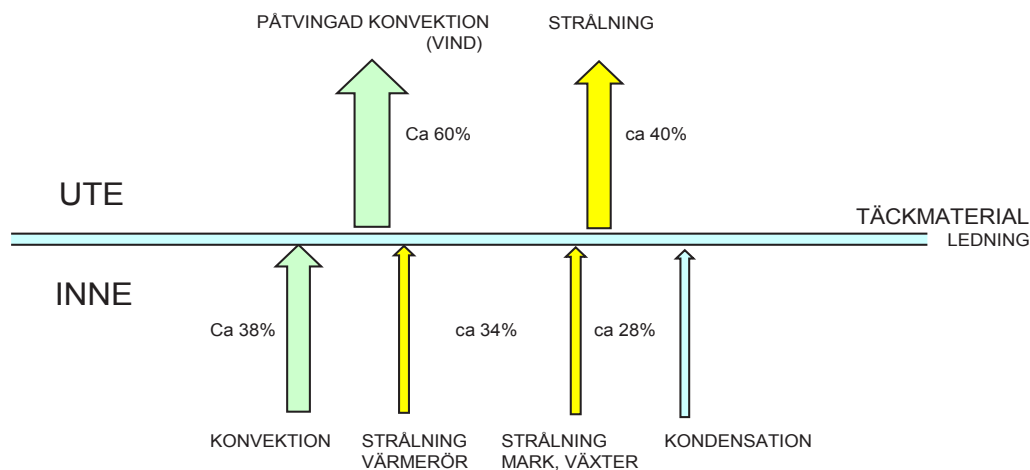
Värme

Värme går till spillo på olika sätt i ett växthussystem. Värmeförlusterna är av både sensibel och latent typ (fri och bunden värme) och då fuktigheten i växthus är hög är den bundna värmen i växthusluften hög. Värme lämnar växthuset genom bland annat ofrivillig ventilation och transmission genom växthusets skal, dvs. genom tak, golv och väggar.

Sensibel värme omvandlas vid avdunstning av fukt i växthuset till latent värme. Den avdunstade fukten ventileras delvis ut med den ofrivilliga ventilationen. En annan del av fukten kondenserar på de kallare tak- och väggytorna i växthuset varvid värme frigörs samtidigt som den våta ytan minskar den transmitterade strålningen på IR-genomsläppliga plastmaterial så att denna typ av värmeförluster minskar något.

Energiförlusterna kan beräkningsmässigt indelas i transmissionsförluster och ventilationsförluster, energi härrörande från avdunstning har betydelse för båda typerna. Hur stora ventilationsförlusterna är beror på luftmängd och entalpi (värmeinnehåll) i aktuell inomhus- respektive utomhusluft.

Värmegenomströmningen (energiflödet) genom ett täckmaterial och dess olika komponenter beskrivs översiktligt i Figur 4 (efter Tantau, 1976).



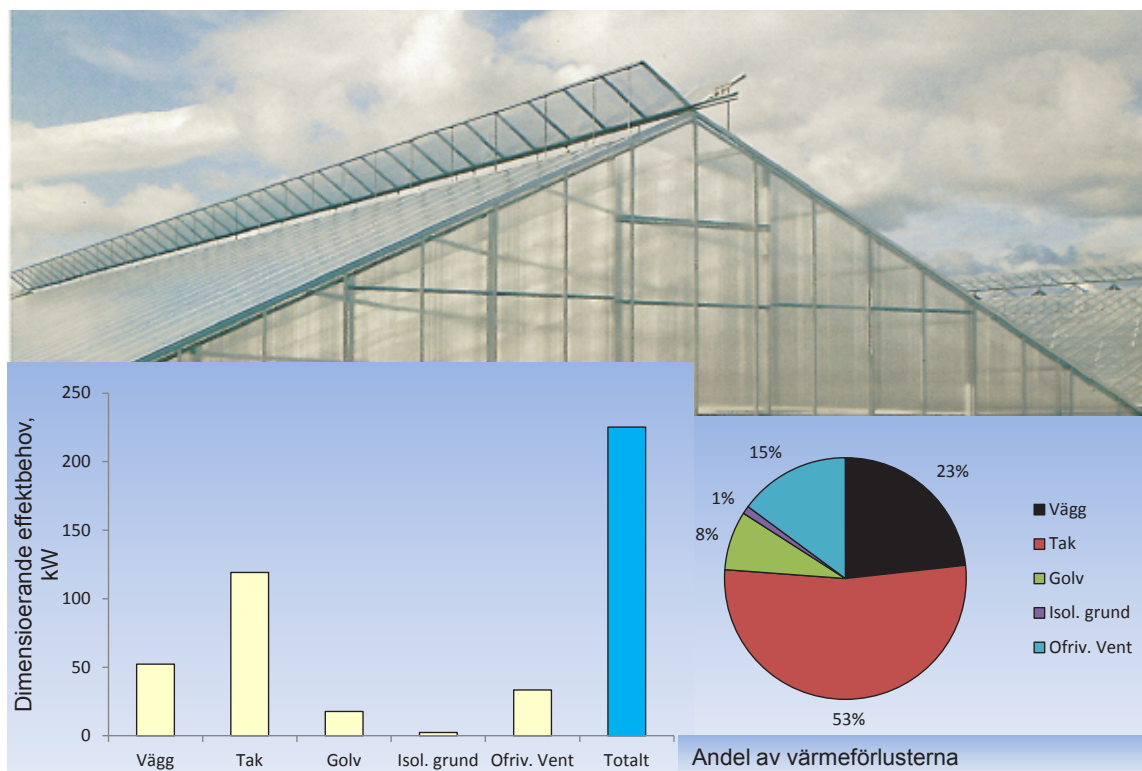
Figur 4. Värmeöverföringen genom ett täckmaterial (efter Tantau, 1976). Storleken på de olika typerna av värmetransport varierar med klimat, konstruktion, installationer, växter och odlingssystem.

Värmeöverföringskoefficienten, kallad U-värde (tidigare k-värde) uttrycker i $\text{W/m}^2\text{K}$ hur stor värmetransporten genom ett material/medium är. En vägg med lågt U-värde innebär god isolering och låg värme- och energiförbrukning.

Värme tillförs i växthuset i stor utsträckning från solen, framför allt under soliga dagar under de varmare årstiderna, men då U-värdena är höga krävs också stora mängder energi för uppvärmning. Belysning och annan elektrisk utrustning tillför också värme i växthuset. Dessa källor räcker inte för att hålla önskad ofta jämn temperatur med tanke på växternas tillväxt och utveckling. Under varma soliga dagar då solinstrålningen kan uppgå till 1000 W/m^2 behövs även effektiva system för att sänka temperaturen, se under Energihushållning.

Konventionella installationer och styr- och regelsystem i moderna växthus erbjuder också möjlighet att styra luftfuktigheten för att minska risken för svampsjukdomar på växterna, t.ex. genom att ventilerat huset när luftfuktigheten går över viss nivå.

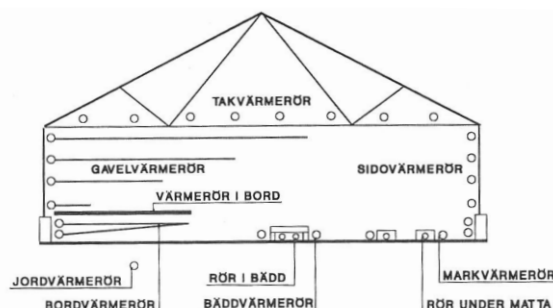
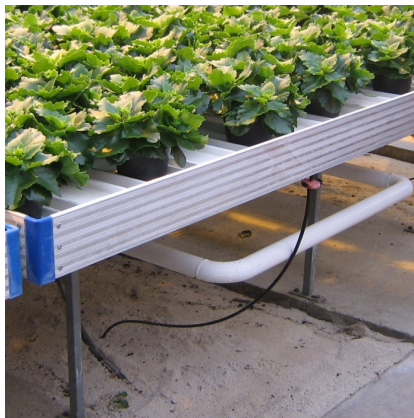
För dimensionering av värmesystem behöver växthuset effektbehov beräknas, dvs. hur mycket värmeenergi som behöver tillföras per tidsenhet. Ett exempel på effektbehov framgår av Figur 5. I ett växthus utgörs huvuddelen av värmeförlusterna av värmetransmission genom tak och också en del genom väggar, medan förluster i golv och grund är relativt sett små (Figur 5).



Figur 5. Exempel på effektbehov för ett växthus vid DUT (dimensionerande utetemperatur) -34°C . Växthuset är 50×16 m, friliggande, har täckmaterial av 2-skikts akrylplattor i väggar och tak och isolerad grund.

Rörvärme

Rörvärme med värmerör placerade i växthuset är det vanligaste systemet för tillförsel av värme i växthus. För att få ett jämnt klimat behövs ett väldimensionerat system som både har shuntgrupper, cirkulationspumpar som pumpar runt det varma vattnet i rören och cirkulationsfläktar som fördelar den varma luften från rören jämnt i huset eftersom ett rörburet system annars ger temperaturvariationer som orsakar konvektionsströmmar i växthusluften. Systemet behöver ge möjlighet att reglera framledningstemperaturen till den önskade delen i växthuset för att ge förutsättningar för bra klimatstyrning utan onödigt höga värmeförluster. Olika avdelningar i huset förses med olika rörslingor och framledningstemperaturerna styrs så att olika avdelningar kan hålla olika temperaturer. Konventionella rörplaceringar framgår av Figur 6.



Figur 6. Värmerörsplaceringar i system med rörvärme i växthus (Foto: Sven Nimmermark).

Varmluftsuppvärmning

Luftburen värme är mindre vanlig än rörvärme i växthus. Fördelen med den typ av luftburen värme som används i växthus är att den snabbt kan fördela värme och torr luft jämnt över växthuset samtidigt som luftrörelserna i system med luftfördelning med plastslangar är små, detta tack vare de små hål som man använder sig av i kanalsystemet (slangarna). Värmen fördelas i växthuset via ett matningssystem med huvudkanaler vidare ut till de enskilda plastslangarna. Ibland används cirkulära huvudkanaler s.k. spirokanaler, men även rektangulära kanaler förekommer. De perforerade plastfolieslangar som är anslutna till huvudkanalerna mynnar ut under ev. odlingsbord eller mitt emellan raderna i t.ex. tomatodling. Huvudkanalerna i plåt bör vara isolerade och skyddade mot väta samt placerade på någon form av värmeisolerande distanser (t.ex. kan de placeras på frigolit eller trä) så att de kommer upp en bit från marken. Plastfolieslangar som placerats i radodling behöver ha en liten håldiameter (2-4 mm diameter) för att värmen främst ska tillföras i raderna eller blåsas mot stammarna på växterna (SJV, 2007b). Den maximala temperaturen i plastfolieslangarna uppgår vid maximalt värmebehov till 35-45°C, men temperaturen är lägre om mindre värme krävs. Summan av hålarean på en slang i förhållande till tvärsnittsarea ska ligga på 0,5-1,0 för att ge jämnt flöde ut över hela slanglängden (Nimmermark, 1992). Slangens diameter anpassas så att lufthastigheten blir lagom hög, man brukar eftersträva en hastighet mindre än 8 m/s (SJV, 2007b). Varmluftssystemet behöver anpassas till den inredning växthuset har och till den aktuella kulturen. I en rapport från Statens Jordbruksverk (SJV, 2007b) menar man att luftburen värme fått oförtjänt dåligt rykte, vilket förklarar att den trots möjligheterna inte används mer. Orsaken kan vara dåligt projekterade lösningar som därmed inte uppfyllt den funktion som ett rätt dimensionerat och utformat system har.

Varmluft kan också användas för att värma upp jorden vid jordodling i växthus. En annan möjlig användning för varmluftssystem är att det kan användas till att med fläktar hämta ner varm luft frånnocken i växthuset till marken/golvet via kanaler/slangar och på det sättet lagra överskottsenergi från dag till natt.

Rena varmluftssystem, dvs. utan någon annan värmekälla i växthuset, är sårbara vid strömavbrott. Någon form av reservsystem för uppvärmning behövs för att garantera att temperaturen hålls uppe (Nimmermark, 1992). Ett varmluftssystem kan kompletteras med ett rör- eller slangsystem vid rötterna och isolering mellan substrat och golv för att säkra rottemperaturen.

Gasbrännare

Gasbrännare används både för uppvärmning, elproduktion och för tillsats av CO₂ i växthuset. Vanligen används naturgas och propan som bränsle. För biogas krävs särskilda pannor som tål de svavelföreningar som oftast finns i biogasen, se avsnitt om biogas. Biogasen ger inte samma tillskott av koldioxid som naturgasen och propengasen per volym men ger större andel CO₂ i förhållande till värmevärdet (Lantz *et al.*, 2006). Rökgaser från gasbrännare kan ledas in i växthuset om halterna av föroreningar är låga och s.k. Low NO_x brännare placeras ibland inuti växthuset.

Energislag och värmekällor

Det finns ett antal olika energislag som används i växthussammanhang. Växthusproduktionen har de senaste åren genomgått en förändring i riktning mot framför allt biobränslen men även användning av värmepump som värmekälla har ökat och lett till minskad användning av fossila bränslen vilka dock fortfarande står för en stor del av energiförbrukningen inom växthusproduktionen. Konverteringen har främst gjorts av de större företagen medan mindre företag med liten omsättning har svårt att finansiera de investeringar som krävs (Myrsten, 2010).

Fossila bränslen – Olja, kol och naturgas

Fortfarande används fossila bränslen som olja och naturgas i många svenska växthus. Av de energikällor som användes år 2011 i svenska växthusföretag utgjorde energin från fossila bränslen (olja, kol och koks, naturgas, gasol) 41% av den totala energiförbrukningen och av dessa stod oljan för 25% av energianvändningen och naturgasen för 14% (SJV, 2012b). Tre år tidigare (2008) stod de fossila bränslena för mer än hälften (59%) av energiförbrukningen i den svenska växthusproduktion, varav oljan stod för 37% och naturgasen för 19%. Användningen av olja hade 2011 minskat till mindre än en fjärdedel av värdena år 1999 då oljan stod för 71% av den totala förbrukningen (Tabell 3 och Figur 7), medan naturgasen minskat mindre vilket kan förklaras av att naturgasen även tillför värdefull koldioxid till växternas fotosyntes och det finns också företag som producerar egen el från naturgas.

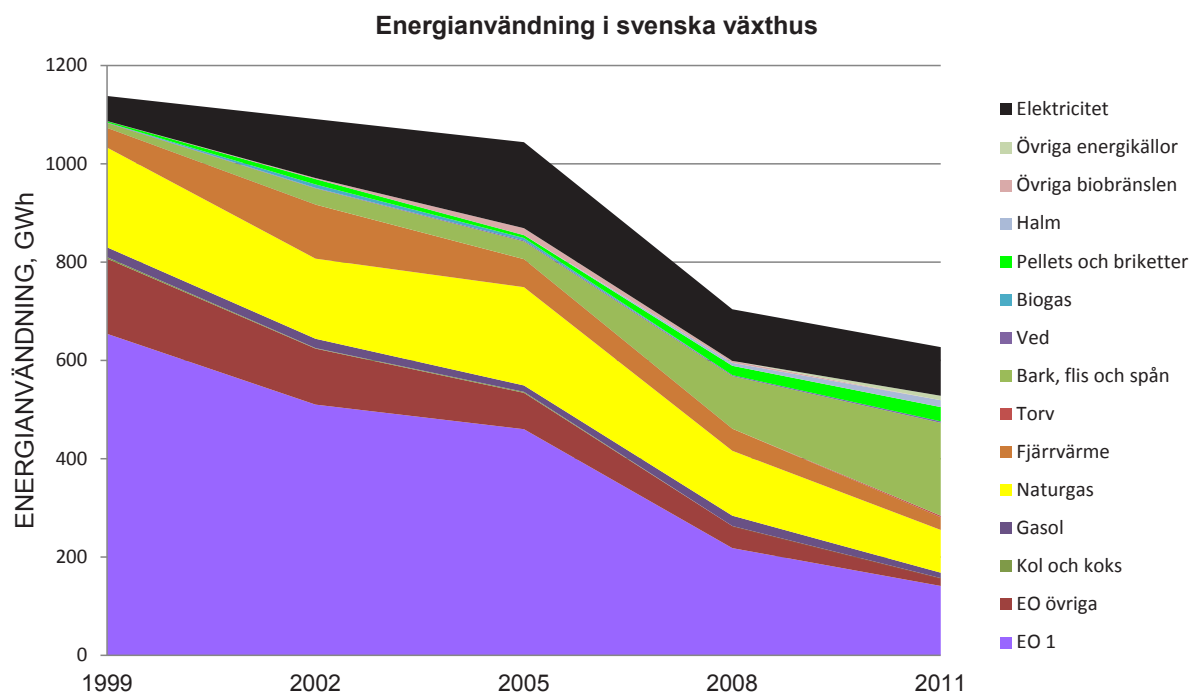
Till följd av konverteringar, investeringar och reducerad energiförbrukning i de svenska växthusen utgjorde användningen av fossila bränslen i anläggningarna år 2011 (255 GWh) endast en fjärdedel av 1999 års förbrukning av fossila bränslen (1033 GWh).

Tabell 3. Energianvändning i svensk växthusodling åren 1999 – 2011 fördelat på energikällor. Källdata: Christensen & Larsson (2010); SJV, (2012b)

Energi­källa	Energi­användning (GWh)				
	1999 ¹	2002 ¹	2005 ¹	2008 ²	2011 ²
EO 1	654	510	460	218	141
EO övriga	153	114	74	45	16
Kol och koks	3	1	2	-	-
Gasol	20	19	13	21	11
Naturgas	203	163	200	132	87
Fjärrvärme	40	110	57	45	26
Elektricitet	51	120	175	105	99
Torv				0	3
Bark, flis och spån	10	33	36	107	189
Ved	1	1	2	2	3
Biogas		7	5	0	-
Pellets och briketter	3	11	6	19	29
Halm				6	14
Övriga biobränslen		2	14	4	-
Övriga energikällor				-	9
Totalt	1140	1095	1044	704	627

¹ Värden enligt Christensson & Larsson (2010)

² Värden enligt SJV (2012) enl. rev. sept. 2012



Figur 7. Energianvändning i svensk växthusodling åren 1999 – 2011 fördelat på energikällor.

Källdata: Christensen & Larsson (2010); SJV (2012b).

Anm. Data avser värden för 2011 från SJV redovisade september 2012. Statistiken från Jordbruksverket som utkom juli 2012 reviderades i september 2012 med avseende på mängden bark, flis och spån som då ändrades från 617 GWh till 189 GWh år 2011.

De senaste åren har en mycket markant övergång till förnybara bränslen skett i växthusodlingen (Tabell 3, Figur 7). Sannolikt kommer de fossila bränslena att fasas ut nästan helt i takt med minskade skattesubventioner på fossila bränslen och ökad koldioxidskatt. Redan från 2011 har subventionerna minskat (skatterna ökat) så att företag som använder fossila bränslen betalar 30% av den generella energiskattenivån i energiskatt på fossila bränslen och en koldioxidskatt på 30% jämfört med 21% året innan och år 2015 kommer skatten att vara 60% (Neova AB, 2011). Det finns risk att många mindre företag kan komma att läggas ner då de inte kan bära de ökade skattekostnaderna och inte har investeringsutrymme för nytt energisystem (Myrsten, 2010).

Vanligt är att en äldre olje- eller gaspanna används för toppbelastningar vintertid vilket ger företaget möjlighet att välja en mindre dimension på den huvudsakliga värmekällan för att få ner investeringskostnaderna jämfört med om huvudvärmekällan skulle klara toppbelastningar. Olje- och gaspannor kan också användas som back-up om den huvudsakliga energikällan inte är i funktion. Den huvudsakliga värmekällan är allt oftare någon form av biobränsle men kan bestå av andra energislag.

Biobränslen - Ved, flis, pellets och torv

Det blir allt vanligare med biobränslen som pellets, flis och ved som energikälla vilka utgör ett attraktivt alternativ för de producenter som vill minska sina energikostnader. Mellan år 2005 och 2008 ökade biobränslenas del av energiförbrukningen inom växthusproduktionen från 6% till 20% och 2011 stod biobränslen tillsammans med övriga förnybara energikällor för hela 37% av energiförbrukningen (SJV, 2010; SJV, 2012b). Enligt en undersökning gjord genom telefonintervjuer med tomat- och gurkodlare säsongen 2009 använde under 2009 63% av tomatodlarna förnyelsebar energi jämfört med 60,5% år 2008 (Möller Nielsen, 2008; Möller Nielsen, 2009).

Flis är billigt men också skrymmande att hantera eftersom det har lågt energiinnehåll i förhållande till vikt.

Pellets av trä är mer komprimerad och har därmed ett högre energiinnehåll volymsmässigt än flis. Förädlingen innebär ett högre pris.

Ved är ett billigt bränsle, men vedeldning kräver en större arbetsinsats än t.ex. fliseldning eller pelletseldning, både före och vid eldning.

Torv, som är ett mellanting mellan förnybart och fossilt bränsle (tar lång tid att bilda), används ofta som inblandning i andra biobränslen för att minska sintring (aska som smälter och bildar beläggning i eldstaden). Torv innehåller dock högre halter av svavel vilket gör den olämplig som ensamt bränsle (kräver svavelrening av rökgaserna).

Spannmål används också som bränsle. Havre har högst energivärde, brinner lättast och innebär minst risk för sintring jämfört med andra spannmålssorter. Särskilda värmepannor för spannmål används.

Priset på bränslet är avgörande och i ett stort företag med tulpanodling används returflis från sopåtervinning som köps in till ett fördelaktigt pris (ATL, 2009) och det finns också möjlighet att elda med annat träavfall t.ex. sågspån (Figur 8).



Figur 8. En växthusanläggning i Kanada där sågspån används för uppvärmning (Foto: Sven Nimmermark).

Biogas

Biogas kan användas för uppvärmning på samma sätt som naturgas genom förbränning i en gaspanna och eventuellt kan också el produceras. Rökgaserna innehåller koldioxid, men då biogasen produceras av organiska substrat i ett kretslopp ger den inget nettotillskott av koldioxid till atmosfären som naturgasen gör. Biogas kan produceras på gårdsnivå, egen eller granngård, och ger både värme och ett värdefullt tillskott av koldioxid till växthuset under dagen då fotosyntesen pågår. Det finns gårdar som investerat i biogas i kombination med växthus.

Rökgaskylning vid panneldning

Alla förbränningsprocesser genererar rökgas av något slag och den värme som går ut med rökgaserna kan tas tillvara med t.ex. en rökgaskylare för att öka verkningsgraden i värmesystemet. Förutom ökad verkningsgrad erhålls minskade utsläpp av t.ex. svavel och stoft. Rökgasåtervinning används vid t.ex. avfallsförbränning där pannorna är mycket stora och bränslet är fuktigt och även för fuktig flis är tekniken intressant då energi bunden i vattenånga kondenseras ut och tas tillvara i processen. För lönsamhet krävs stora anläggningar.

Rökgaskylning används t.ex. ofta i grönsaksodling innan rökgaserna återförs till växthuset för att ta tillvara koldioxiden (Lantz *et al.*, 2006).

Sol och vind

Solinstrålning är den naturligt största källan till energi i växthus. Tillgången är stor på sommaren och då är det också möjligt att på olika sätt lagra energin i t.ex. marken. Detta kan göras genom att lagra energin i vatten eller annat medium och sedan föra ner det varma mediet i marken till ett värmelager. Jorden under växthuset kan på detta sätt användas för lagring av solvärme som kan användas under svalare perioder. För att kunna använda den i jorden lagrade värmen, kan en värmepump utnyttjas för att gradera upp värmen till mer användbara temperaturer. System med solvärmelagring och jordvärme med slangar i marken kring växthuset kan också utnyttjas. Med hjälp av värmepump i kombination med ackumulatortank kan systemet värma växthuset under stor del av året. För att klara toppbelastningar behövs en annan energikälla (SJV, 2007b).

Vindkraft används i ökande omfattning och uppgick i Sverige år 2011 till 6,1 TWh (4,2 % av elproduktionen) vilket kan jämföras med 0,63 TWh (0,5%) år 2003 (Energimyndigheten, 2012). Vindkraftverket kan producera el, som sedan används för belysning och möjligen också uppvärmning i växthuset. De vindkraftverk som byggts på senare år är stora; små gårdsverk byggs i begränsad omfattning.

Enligt en kartläggning av svensk växthusproduktion finns odlingar som har egen vindkraft men de är få (SJV, 2012a).

Värmepumpsystem

Den värme som nyttiggörs via värmepump kan komma från olika källor såsom luft, grundvatten, jord, restvärme från olika processer inom industri eller från kraftvärmeverk. Värmepumpstekniken möjliggör tillvaratagande av den låggradiga energin genom att växla upp den till högre, mer användbara temperaturer som sedan kan användas i rörvärmesystem eller varmluftssystem i växthuset.

Vid tillförsel av värme i växthuset kräver låggradiga värmekällor större värmeväxlaryta vilket fördyrar anläggningarna betydligt. Det gäller därför att hitta kostnadseffektiva system för värmeväxling. Ett sådant kan t.ex. vara batterivärmeväxlare som används i luftvärmesystem. Walker & Duncan (1978) refererar till en studie där luften fick återcirkulera över värmeväxlaren med större lufthastighet än i en vanlig vatten-luftvärmeväxlare. I en studie (Madewell *et al.*, 1975) lät man värmevatten rinna över avdunstningsblock (befuktarblock) som monterats i växthuset och genom vilka luften återcirkuleras. Systemet klarade att hålla önskad temperatur men det uppstod problem med att kontrollera fuktigheten, dvs. att undvika att daggpunkten uppnås. Luftfuktigheten begränsades i viss mån av värmebatterier placerade i luftflödet efter befuktarblocken.

Ett sätt att öka värmeväxlarytan till begränsad kostnad är att låta låggradig värme (restvärme) matas ut i plastledningar på golvet. Vid radodling kan plastledningarna läggas mitt i raden/mellan raderna av t.ex. tomater eller andra radkulturer (Buclon, 1975).

Beroende på värmekällan och kvaliteten (temperaturen) på värmen används också olika typer av värmepumpsystem.

Restvärme som energikälla

Restvärme från olika industriella processer och från kraftvärmeverk är en resurs som alltmer tas tillvara. Vid bl.a. kraftverk produceras en stor mängd värme som kan tas tillvara. Andelen varierar en del, 47-65% av energin överförs till restvärme i kylvatten från kraftvärmeverk och ytterligare 12% försvinner ut med rökgaserna (Burch, 1985). Fastän tekniken i viss mån förbättrats i nyare kraftvärmeanläggningar är andelen värme som produceras av samma storleksordning idag. Grovt kan man räkna med att värmeenergin som produceras vid dessa processer oftast är dubbelt så stor som den el som produceras och alltså utgör en betydande resurs att ta vara på. Detta görs också i kraftvärmeverk, men i många fall finns en restprodukt med lågradig värme med stort sammanlagt energiinnehåll att tillgå.

På 1970- och 1980-talet genomfördes studier av möjligheten att använda restvärme från kraftverk till odling i bl.a. växthus (Olszewski, 1978). Vid Oak Ridge National Lab. (ORNL) utfördes med början 1969 studier där både möjligheterna att använda restvärmen vid växtproduktion och djuruppfödning studerades. De restvärmetemperaturer som var aktuella i dessa studier var nivåer upp till 49°C. I systemet använde man sig av ett s.k. "Pad and Pan" system (system med förångning av värmevattnet) där plastfilm avskiljer den översta delen ("vinden") i växthuset eller djurinhysningssystemet, från övriga växthuset/stallet. En skiss redovisas i artikelns Figur 1 (inlagd originalbild nedan i Figur 9) där principen är att befuktarblock fyllda med fibermaterial överstrilas med värmevatten från kraftverkets kondensor, vattnet droppar ner längs fibrerna medan en horisontell luftström genom blocken tar med sig värmen alternativt kylan ut i luften (beroende på temperaturförhållandet mellan inblåst luft och växthusluft).

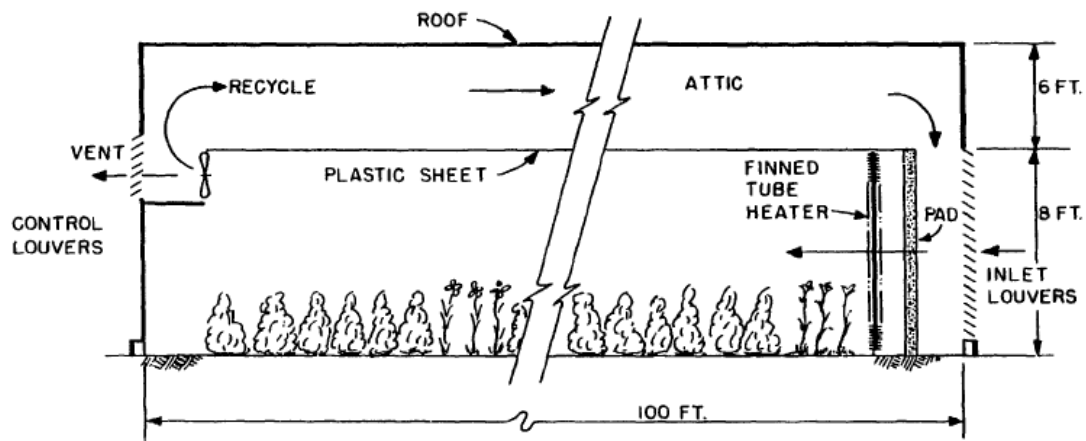


Fig. 1. Schematic of greenhouse or animal shelter heating system.

Figur 9. Uppvärmningssystem med restvärme som tillförs via befuktarblock där restvärmevatten strilas över befuktarblock (Olszewski, 1978). I systemet för uppvärmning av växthus med hjälp av befuktarblock (förångning av värmevatten i kuddar av fibermaterial) strilas värmevatten över den evaporativa befuktaren och med hjälp av fläktar som drar växthusluft genom de varma och blöta blocken (kuddarna) tillförs värme till växthusluften.

Det kylda värmevattnet fångades upp under befuktarblocken och återfördes till kondensorn. Värmevattnet från kondensorn kunde också pumpas genom en värmare med kamflänsrör/värmebatteri så att den tillförda luften värmdes och torkades av värmen från kamflänsrör/värmebatteriet. Temperatur och luftfuktighet som förs in i växthuset kunde styras genom att variera det relativa förhållandet mellan den mängd vatten som pumpades genom befuktarblock och värmebatteri och också genom reglering av luftflödet genom komponenterna. Samma system användes både för uppvärmning på vintern och för kylning på sommaren.

I systemet sker en direktkontakt mellan värmevattnet och luften i växthuset och värmeöverföringen blir effektiv, men luftfuktigheten i växthuset höjs också. För en del växthuskulturer är denna förhöjda luftfuktighet ett problem och en förutsättning för att använda systemet är att aktuell kultur kan tolerera detta. Burch (1985) angav att värmeöverföringen är effektiv vid låga temperaturer, men att man övergav utvecklingen av systemet i de fall då överskottsvärmen håller lite högre temperatur ($>27^{\circ}\text{C}$; 80°F)

ORNL-systemet utvärderades ekonomiskt och vid en kylvattentemperatur på 27°C var systemet mer ekonomiskt än ett system med fossilt bränsle vid de ekonomiska förutsättningar som gällde. Om däremot systemet endast användes för restvärme på maximalt 21°C var det inte säkert att systemet var ekonomiskt lönsamt och man menade att detta beror främst på de klimatiska förhållandena (Burch, 1985).

Slutsatsen drogs att möjligheterna att använda restvärme för växthusuppvärmning beror på temperaturen på kylvattnet. Vid utformandet av kraftverket behöver temperaturbehovet hos de odlade kulturerna tas i beaktande. I studiens framkom att det var önskvärt med mer än 21°C , gärna 27°C i kylvattnet som växthuset tillgår. Detta främst för att det ska bli ekonomiskt intressant att använda restvärmen från vattnet för odlingen. Temperaturer under 21°C var inte intressanta (Burch, 1985).

De studier som genomfördes på ORNL sammanfattades med att ekonomiska och marknadsmässiga aspekter begränsar användbarheten av restvärme för växthusuppvärmning. (Olszewski, 1978). Olszewski (1978) förde fram att det finns behov av billigare värmeväxlare, kanske i plastmaterial, för att kunna öka kostnadseffektiviteten. Ett förslag var att börja studera och analysera möjligheterna för enklare typer av värmeväxlare, t.ex. med vattnet strömmande på insidan av en panel medan växthusluften och vattnet i akvakulturen strömmar över den yttre delen av panelen. Panelmaterial föreslogs vara polypropylen eller polykarbonat.

Vid Browns Ferry kärnkraftverk i närheten av Athens i Alabama byggdes ett kommersiellt växthus som använde sig av restvärmen från kärnkraftverket (Burch, 1985). Det växthus som anlades vid kraftverket var 2350 m^2 och byggdes ursprungligen 1978 som ett demonstrationsväxthus men 1982 arrenderades det av en privat odlare. Växthuset var uppdelat i tre delar varav en värmdes konventionellt och två värmdes med restvärme. Restvärmen från kärnkraftverkets kylvatten höll en temperatur som när vattnet nådde växthuset var så låg som $14\text{--}21^{\circ}\text{C}$ i januari. För att kunna ta tillvara värme vid de låga temperaturerna användes våt värmeväxlare i direktkontakt med kylvattnet (s.k. "evaporative pads" - befuktarblock). Som

back-up system för uppvärmning användes gas och propanbrännare (forced-air propane unit heaters). För lokal och obegränsad tillgång till restvärmen betalade odlaren en fast årsavgift som skrevs upp med 6% årligen.

I litteraturen finns också en växthusodling vid Astoria oljekraftverk, New York, beskriven. I denna anläggning beskrivs att växthuset erhåller kylvatten som håller 40-49°C. Då vattnet från kraftverket var salt och innehöll oljerester användes en mellanvärmväxlare och de temperaturer som fanns att tillgå efter mellanväxlaren blev ca 38°C. Back-up systemet utgjordes av vattenånga från kraftverket som injicerades i växthusets recirkulerande värmesystem. På det sättet svarade kraftverket för all värme som behövdes i växthusanläggningen, dvs. även för toppförbrukningen. Däremot fanns ingen back-up ifall systemet inte skulle fungera, t.ex. vid ev. driftstopp. Ett långtidskontrakt fanns som reglerade åtagandet från kraftverket och växthusföretaget. (Burch, 1985).

En sammanställning av några olika anläggningar där restvärme utnyttjas för uppvärmning av växthus framgår av Tabell 4.

De studier som gjordes under 1970-1980-talen resulterade inte i någon kommersiell odling knuten till låggradig energi från kärnkraftverk och de försöksväxthus som fanns, t.ex. i Athens, finns inte längre kvar (Olszewski, pers. medd. 2012).

I studier på Alnarp på 1980-talet (Håkansson *et al.*, 1984) odlades jordgubbar med olika plasttäckning i mark som värmdes upp med rørslingor med en vattentemperatur på 20°C och 30°C. Uppvärmningen av marken resulterade i tidigare skörd främst för jordgubbar som odlades i plasttäckt mark eller i plasttunnel. I plasttunnlar med uppvärmd jord var skörden 24-28 dagar tidigare än i ouppvärmda och täckta försöksled. Enbart uppvärmning utan täckning gav några få dagars tidigare skörd (3-6 dagar). Folietäckt uppvärmd mark gav 9-15 dagars tidigare skörd. Vid mätning av temperaturen i marken på våren uppmättes på 15 cm djup en ökning på 3-8°C i jord utan plasttäckning, 4-9°C i plasttäckt jord och 5-10°C temperaturökning i jorden i plasttunnlarna.

Ventilation

Naturlig ventilation

För att styra luftfuktighet och temperatur i växthuset används i traditionella växthus framför allt ventilation dvs. fuktig och varm luft ventileras ut för att hålla ett växthusklimat som gynnar växterna. Ventilationsluckor sitter vanligen placerade inocken men i äldre friliggande sadeltakshus sitter även luckor under takfoten. Genom att varm luft stiger fås en skorstenseffekt. Styrningen av luckor som används för ventilation görs bl.a. med hjälp av temperaturgivare i växthuset.

Tabell 4. Anläggningar med växthusanläggningar som utnyttjar industriell restvärme enligt Burch (1985)

Källa	Temperatur °C (°F)	Värmeöverförings- teknik	Odlad produkt	Växthusyta <i>m² (acres)</i>	Företag med överskottsvärme	Belägenhet	Etab- lering <i>År</i>
Etanolfram- ställning	65 - 68 (150-155) ^V	Fläktkonvektorer (fläktluftvärmare)	Sallad	36 400 (9)	Archer Daniel Midland Co	Decatur, IL	1982- 1985
Kolkraftverk	27-30 (80-85) ^V	Fläktkonvektorer (fläktluftvärmare)	Tomater ^J	80 900 (20)	Central Electricity Generating Board	Yorkshire, England	1981
Kolkraftverk	26 - 46 (78-115) ^V	Fläktkonvektorer (fläktluftvärmare) + inbäddade rör i golv; Backup/tillskott: gasbrännare (propan)	Rosor (70%), snittblommor, krukväxter	17 200 (4,25)	Northern States Power	Becker, MN	1977- 1979
Kolkraftverk	>32 (>90) ^V	Inbäddade rör; Backup/tillskott: gasbrännare (propan)	Utplanterings- växter, blommande växter, amplar	46 400 (11,5)	Pennsylvania Electric	Homer, PA	1985
Kolkraftverk	32 - 46 (90-115) ^V	Flödvärme golv och hybridsystem med flödvärme golv och fläktluftvärmare	Blommande växter, tomater, sallad	55 000 (13,6)	Pennsylvania Power Light	Washingtonville, PA	1980- 1985
Oljekraftverk	>38 (>100) ^{V, vx}	Fläktkonvektorer (fläktluftvärmare); Backup/tillskott: ångtillförsel till växthusets värmesystem	Gurka, tomat, sallad	4000 (1)	Power Authority of the State of New York	New York, NY	1983
Kolkraftverk	38-52 (100- 125) ^{V, exp}	Fläktkonvektorer (fläktluftvärmare); Backup/tillskott: värmevatten panna	Rosor, tomater, Chrysanthemum ("mum"), lejongap ("snapdragons")	10 100 (2,5) 28 300 (7)	South Carolina Public Service Authority	Cross, SC Georgetown, SC	1984 -
Kärnkraftverk	14-21 (57-70) ^V	Befuktatblock (förångning av värmevatten i kuddar av fibermaterial) Backup/tillskott: gasbrännare (propan) [*]		1500 (0,38)	Tennessee Valley authority	Athens, AL	1978

J = Joint venture

V = Vintertid

Vvx = saltvatten som kylvatten med mellanvärmexlaren till växthusets värmesystem

Exp = förväntat värde

* = Försöksanläggning med avdelningar med konventionell uppvärmning och avdelningar med uppvärmning med restvärme

Enklare båghus ventileras ofta enbart via gavlarna som då hålls öppna. Ibland kompletteras denna ventilation med anordning som gör det möjligt att dra isär plastfolien i båghusets topp. Är båghuset mer påkostat finns kanske ventilationsluckor eller annan öppning, t.ex. i långsidan. Venlohus har ofta bara ventilationsluckor inock och då flera block är sammanbyggda finns luckorna oftast på en nocksida på alla blocken (SJV, 2007b).

För att undvika skador stängs luckorna automatiskt vid höga vindstyrkor (>12 m/s) och styrs även så att de inte öppnas då det är risk för att de frusit fast. Styrningen sker med hjälp av sensorer inne och ute (vindhastighet, vindriktning, temperatur).

Mekanisk ventilation

De allra flesta växthus är naturligt ventilerade, men i en del fall förekommer mekanisk ventilation. Vid mekanisk ventilation kompletteras/ersätts ventilationsluckorna med fläktar i huset som möjliggör en mer noggrann reglering och bättre energihushållning/koldioxidhushållning. Fläktarna användes då vid mindre ventilationsbehov medan takluckorna öppnar vid större ventilationsbehov så att ett jämnare klimat kan erhållas (Nimmermark, 1992).

Avfuktning

När luftfuktigheten är hög i växthuset förekommer det att vatten kondenserar ut mot växthuskonstruktionen och bladytorna. Växternas blad kan bli missfärgade och risken för angrepp av olika svampar ökar (svartprickröta, jordsvampar och gråmögel). För att undvika detta ventileras överskottsfukt ut ur huset eller alternativt avfuktas växthusluften med hjälp av en luftavfuktare. Ventilation är det vanligaste sättet att hålla nere luftfuktigheten, men avfuktare kan i vissa fall ge vinster i energikostnader och koldioxid. En avfuktare ger möjlighet att i större utsträckning än annars hålla en hög koldioxidhalt (Nimmermark, 1992).

Det finns två vanliga huvudprinciper för avfuktare, avfuktning genom kylning eller sorption. Kylavfuktare fungerar bäst vid varma temperaturer (ned till 15°C) medan sorptionsavfuktare klarar kallare temperaturer bäst.

Avfuktaren dimensioneras för att klara avfuktning de tider då ventilation inte är aktuell pga. låg instrålning. I växthus dimensioneras avfuktaren med hänsyn till fuktavgivningen hos den aktuella kulturen och fuktavgivningen från växthusets övriga ytor. Avfuktaren bör kombineras med andra åtgärder för att hålla nere fuktigheten som t.ex. täckning av odlingssubstrat och att bevattningssystemet inte ger spill som ökar på fukten i växthuset. Fuktavgivningens storlek ökar med ökad instrålning så att en hög instrålning ger stor fuktavgång och därmed snabbt ökat avfuktningssbehov som enklast avhjälpas med ventilation.

Koldioxid

Koldioxid tillförs i växthuset för att optimera produktionen. Tillförseln kan ske på olika sätt. En vanlig metod är att köpa koldioxid i tank och med hjälp av slangar tillföra den i växthuset. Styrutrustning för dosering av koldioxiden ser till att doseringen blir rätt och t.ex. inte överdoseras med onödiga kostnader som följd.

Andra sätt att tillföra koldioxid är att bränna naturgas eller propan i växthuset eller att den tillförs från en gaspanna i separat utrymme genom att rökgaserna leds in i växthuset via en doseringsutrustning som fördelar gasen i tunna plastslangar i växthuset (Nimmermark, 1992).

Styrning

Klimatet i växthuset styrs för att anpassas till växternas behov men också för att hushålla effektivt med energin som är en stor kostnad i växthussammanhang, förutom de självklara

miljöeffekter energianvändningen har. Målet är att skapa ett optimalt klimat för växten genom styrning av olika klimatparametrar.

Klimatet i växthuset är mer eller mindre datorstyrt, hur avancerat beror på hur mycket växthusföretaget satsar på att kunna styra klimat, bevattning och energi. Ju mer avancerat system desto större möjlighet att skapa ett dynamiskt klimat som passar de kulturväxter som odlas. Parametrar som kan styras är temperatur och fuktighet med kompensation för vind och nederbörd men även koldioxidtillförsel, skuggning, belysning, mörkläggning och styrning av energivävar. Givare mäter de olika klimatparametrarna inklusive uteklimatet och informationen används av klimatdatorn för att styra vävar, energitillförsel etc.

Temperatur- och belysningsstyrning kombineras t.ex. vid användning av negativ DIF som nämndes tidigare.

Energihushållning

Systematisk genomgång av och införande av energisparåtgärder kan spara så mycket som 90% jämfört med om inga särskilda åtgärder vidtas (Tantau *et al.*, 2009). Lösningen är att kombinera olika åtgärder och **samtidigt** studera hur växterna påverkas av åtgärderna. Detta innefattar att bedöma hur kulturväxterna utvecklas, t.ex. om åtgärderna försenar utvecklingen av växterna. Målet är ofta att inte införa åtgärder som försenar produktionen, dvs. resulterar i längre utvecklingstid, senare skördestart och lägre skördenivå (Christensen & Larsson, 2010). För växternas välmående är det också viktigt att kunna kontrollera fuktigheten i växthuset och kring växterna. Ett alltför fuktigt klimat ger ökad risk för svampsjukdomar så det finns ett behov av att kunna avfukta luften innan den blir alltför fuktig. Energihushållning kan med fördel kombineras med dynamisk klimatstyrning.

Ofrivillig ventilation och energi

I ett växthus sker ofrivillig ventilation olika mycket beroende på växthusets täckmaterial och vindhastighet utanför växthuset. Ett tätt material t.ex. en folie ger en lägre luftomsättning än t.ex. ett **otätt** enkelglashus av äldre typ med många skarvar. Vid låg vindhastighet är den ofrivilliga ventilationen liten för i princip alla täckmaterial / alla växthustyper. Ett **otätt** enkelglashus ger dock snabbt ökad luftomsättning för att redan vid 3 m/s ligga på uppåt 2 omsättningar/timme medan ett tätt enkelglashus t.ex. ligger kvar på en relativt låg nivå oavsett vindstyrka (Tarkiainen, 1986).

Energivävar och andra isolerskikt för minskad energiåtgång

För att öka isolermöjligheterna under extrema klimatförhållanden som t.ex. under den kallaste vinterperioden eller under sommarens varmaste dagar kan olika system som erbjuder isolering alternativt skuggning användas för att påverka olika klimatfaktorer. Flexibla isolersystem kan t.ex. vara energivävar eller skuggvävar men även andra material och lösningar är möjliga.

Olika typer av vävar

Det finns olika typer av vävar med olika energibesparingspotential. Skuggvävar som främst är avsedda för skuggning kan även ge energibesparing under den tid de är fördragna, besparingen kan bli upp mot 75% (Nimmermark, 1992). Energivävar dras företrädesvis för

nattetid med hjälp av ett vadersystem och ställmotorer. Nackdelen med fast installerade vävar är att de även ger viss skuggning när de är frändragna och därmed orsakar en sänkning av önskad ljusinstrålning som förtar en del av besparingseffekten.

Andra flexibla isolerlösningar

Ett *flexibelt isolersystem* behöver vara lättskött och inte innebära alltför stora investeringar av företaget. Det ska erbjuda en teknisk lösning som gör det lätt att använda isoleringen när den önskas och lätt att ta bort när isoleringen eller skuggningen avslutas. Anordningen och materialet som används bör inte heller påverka instrålningen negativt då bra ljusförhållanden är viktigt för växternas utveckling, t.ex. genom kvarliggande material eller skuggningseffekter vid tider på dagen då ljusinstrålningen ska maximeras för att ge optimalt resultat.

Det finns olika material som använts för att skapa flexibel isolering. Ett material som använts till att skapa ett isolerskikt i akrylplattor är polystyrenpellets. Vid utveckling av systemet har olika parametrar som påverkar systemets funktionalitet studerats (Enshayan & Short, 1986). Exempel på studerade parametrar är tryckfall, påverkan på flöde och tryck i raka och böjda sektorer, vilka omständigheter som styr igensättning i systemet, t.ex. fläktstyrka, avstånd från utlopp och hur olika blandningar av luft och pellets fungerade i systemet.

I en senare studie pumpades pellets in i kanalerna på akrylplattor med 32 mm breda kanaler som isolerskikt men också variabel skuggning (möjlighet att skugga 25%, 50%, 75% och 100%) genom att olika stor del av kanalerna fylldes med polystyrenpelletsen (Elwell & Short, 1989). Isoleringen var i första hand avsedd som isolering nattetid. I studien (Elwell & Short, 1989) undersökte man hur pelletsen kunde göras mindre elektriskt statiska för att minska andelen som statiskt fastnade ute i akrylkanalerna och minskade instrålningen, något som varit ett problem i tidigare studier vid Ohio State University, Wooster, USA (Kuack, 1986) under det att systemet utvecklats. Elwell & Short (1989) fann att glycerinbehandling av pelletsen fungerade bra som antistatbehandling men att behandlingen behövde upprepas med jämna mellanrum då glycerinet med tiden torkar ut och den antistatiska effekten minskar. Den kommersiella produkt för antistatbehandling som också var med i studien fungerade sämre än glycerinet. Författarnas slutsats var att man bör använda material som inte är fuktberoende vid antistatbehandling av polystyrenmaterialet.

I andra system har skum använts som isolermaterial (Aberkani *et al.*, 2011). I Kanada har ett system för skum utvecklats för att förbättra isoleringen i växthus, även detta startade under energikrisen på 1970-talet. Tekniken är utvecklad av Sunarc of Canada Incorporation, Quebec. Tekniken har vidareutvecklats under senare år (Aberkani *et al.*, 2011). Skummet åstadkoms genom att vatten och ytspänningssänkande medel blandas och injiceras med hjälp av skumgeneratorer installerade mellan två omgivande lager av polyetenfilm i växthusetsnock. Då skummet efter 2-3 timmar föll ihop till vatten krävdes att sensorer kände av när det var dags att fylla på med nytt skum för att hålla isoleringen intakt. Skum som fallit ihop till vatten dränerades tillbaks för att kunna återvändas. För att garantera att ljusgenomsläppligheten inte påverkades installerades sprinklers pånocken, som tvättade bort alla skumrester vid gryningen då skumisoleringen togs bort. Studien visade att materialet har en hög energisparpotential med 29-62% lägre energiåtgång i försöken, men att materialet

behöver utvecklas vidare då besparingsgraden minskade med sjunkande utetemperatur. Troligen berodde den sjunkande besparingseffektiviteten på att skummets fysikaliska egenskaper förändrades. Växthus med skumisolering nattetid höll en något högre temperatur, både i luft och på blad vilket bör främja planttillväxt och utveckling och ge möjlighet till tidigare skörd (studien gjordes med tomat och paprika som kulturer), alternativt ge möjlighet till att sänka uppvärmningstemperaturen för ytterligare energibesparing. Energikällan i både kontrollväxthus och försöksväxthus var en gaspanna.

Skum har också använts som skuggningsmetod dagtid under sommaren (Aberkani *et al.*, 2010). Studier visade att skuggning under soliga dagar sänkte temperaturen i växthuset med upp till 6°C i de två försöksväxthusen, belägna i Quebec respektive Ontario, och att den relativa fuktigheten hos växthusluften höjdes med 5-12% samtidigt som luftningsbehovet minskade. Villeneuve *et al.* (2005) menar att skumisoleringen kan användas för att fördröja luftning i växthuset under varma sommar dagar och därmed kan man använda tillsats av koldioxid vid högre utetemperatur än annars (med ökad tillväxt som följd).

Varmluftsuppvärmning och röruppvärmning i energihänseende

Avfuktning och energi

Det vanligaste sättet att avfukta ett växthus när den relativa fuktigheten är hög är att ventileras ut fukten. Tillsammans med fukten försvinner också värme ut ur huset. Hur mycket energi som luftas ut genom ventilation beror på vilken relativ fuktighet man vill hålla i växthuset, en lägre fuktighet kräver mer luftning än en högre. Genom att istället använda en avfuktare med värmepumpsprincip kan energiförlusterna minskas betydligt särskilt om man eftersträvar en låg fuktighet i växthuset, men dyrare elenergi måste då användas till värmepumpen och beroende på elpriset kan det kosta mer än värmeenergin som förloras vid luftningen.

Möjlighet finns också att använda värmeväxlare för avfuktning och återvinning av energi ur luften som ventileras ut (Rousse *et al.*, 2000).

Energilagring

Lagring av energi görs på både kort och lång sikt för att bättre tillvarata energin mellan perioder då mycket energi finns att tillgå och när det är underskott på energi. På kort sikt kan värmeenergi lagras i ackumulatortankar för användning av instrålad solvärme eller från eldning av bibränslen och fossila bränslen. På så sätt kan energi som används under nätter och kallare perioder delvis tas från lagrad värme.

Målet är även att kunna lagra på längre tid i så kallade termiska lager, Thermal Energy Storage (TES). Värmepumpsteknik används ofta för att ta ut och lagra in energi från till lagret.

Det finns olika typer av TES varav Aquifer Thermal Energy System (ATES) använder vatten för lagringen. En annan teknik är Borehole Thermal Energy Storage (BTES).

BTES går ut på att göra ett antal borrhål i marken; antal hål och hur djupa de är beror på hur mycket energi som ska lagras. Spillvärme kan ledas till ett energilager för att värma upp marken kring borrhålen. För ökad energilagring kan samtidigt solenergi tas tillvara med hjälp av kollektorer i marken – slangar som är fyllda med vätska och ligger nedgrävda under markytan. Sommartid kan ett BTES system användas för att kyla t.ex. ett bostadshus eller ett växthus.

Aktiv lagring av värme i marken är ovanligt, men geoenergi används i några anläggningar. Ett växthusföretag som använder bergvärme är Stella Växt AB utanför Kristianstad. Användningen av bergvärme har minskat oljeförbrukningen i produktionen från 250 till 40 m³ per år och utsläppen av koldioxid har minskat med mer än 80%. En stor tulpanodling i mellansverige använder sig av borrhåls energibrunnar både för värmning och kylning av produktionsutrymmena dvs. växthus och kylrum (Geotec, 2008).

Värmelagring i mark kan användas för att få tidigare start på produktion i enklare växthus och plasttunnlar där odlingen sker i jord då marktemperaturen påverkar starten på odlingssäsongen. Målet vid termisk lagring är att ta ut lika mycket energi som lagras in så att en balans uppstår i systemet. En temperaturvariation kan finnas över året beroende på hur stor inlagring och användning är. Ett sätt att öka effektiviteten i systemet kan vara att gradvis öka temperaturen genom att tillföra mer energi till systemet än vad som tas ut så att en ”energikudde” skapas.

ATES-system kan användas med eller utan värmepump för både uppvärmning och kylning. Tekniken har främst används för klimatisering (uppvärmning och kylning) av bostäder men blir allt vanligare inom industri och växthusodling (Paksoy *et al.*, 2008). Dock räcker oftast inte värmen från t.ex. industriprocesser, solfångare eller värmepumpar till för att kyla lokaler som används för kylning sommartid. Både som kylsystem och uppvärmningssystem behöver ATES kompletteras med extra värme- och kylutrustning för att klara toppbehoven i endera fallen. I en studie gjord vid universitetet i Cukorova, Turkiet, jämfördes växthus på vardera 360 m² som i ena fallet tillfördes restvärme och solvärme via ett vattenlager och i det andra fallet ett växthus som värmdes upp konventionellt med olja som bränsle (Turgut *et al.*, 2009). Det via värmelagret uppvärmda växthuset visade på större tomatkördar (20% högre skörd) med fler klasar samt tjockare stam, större frukter och högre plantor. Tomatplantorna hade även högre färskvikt och torrsvikt än plantorna i det konventionella växthuset. Odlingen skedde vintertid och klimatmässigt klarade det ATES-uppvärmda växthuset att hålla en minimitemperatur på 12°C. Den högre investeringen för ATES betalade sig på ett år i de beräkningar som gjordes genom lägre driftskostnader. Energiförbrukningen var 78% mindre än för kontrollväxthuset (Turgut *et al.*, 2009).

Lågenergiväxthus i Tyskland

I Tyskland har man i ett projekt, ”Zukunftsinitiative Niedrigenergiegewächshaus“ (ZINEG), byggt upp fyra stycken växthus där man studerar möjligheterna att minimera användningen av fossil energi och därmed reducera avgivningen av koldioxid (CO₂) till ett minimum. En av de ledande i projektet har varit Prof. Jürgen Tantau vid Leibniz Universität, Hannover som dock

nyligen pensionerat sig. I projektet där ett antal tyska universitet deltar studerar man systemen dels ingenjörsmässigt och dels odlingsmässigt. I försöksväxthuset i Hannover studerar man möjligheterna för maximal isolering med specialskikt i väggar och 3-dubbla vävskikt, solenergilagring på dygnsbasis och optimering av växtklimatet. I försöksväxthuset i Berlin studeras optimeringen av ett ”stängt växthus-koncept” med kollektor och värmepump, vävar, energilagring för längre period, optimerad styrning och reglering och växtrespons på olika klimat.

Växthuset i Berlin var det första ZINEG-växthuset som byggdes och det har varit i drift sedan 2010, medan de övriga växthusen inte varit i drift lika länge. Med syfte att studera tekniken och hittills gjorda erfarenheter i ZINEG-projektet gjordes ett studiebesök i växthuset i Berlin och Prof. Uwe Schmidt vid Humbolt-Universität, Berlin berättade om anläggningen och erfarenheterna hittills. Vid anläggningen finns dels ett ”solkollektorhus” och också ett referensväxthus (Figur 10 och 11).



Figur 10. Solkollektorväxthuset i Berlin ingående i det tyska ZINEG växthuset (Foto: Sven Nimmermark).

Det stängda växthuset (solkollektorväxthuset) är utrustat med dubbla vävar och 4 stycken kamflänsrör placerade strax under yttertaket i varje fack av Venlo-växthuset (Figur 11). Dessa

kamflänsrör är anslutna till förångarsidan i en värmepumpskrets och kyla så att överflödigt vattenångor i växthuset kondenserar ut och överflödigt solenergi kyls också bort. På värmepumpens kondensorsida förs den utvinna värmen till ett energilagret och energi tappas från lagret och utnyttjas i växthuset vid tillfällen då växthuset behöver värme. Värmelagret är dimensionerat för 1 m³ vatten per m² växthusyta, vilket är mer än vad som behövs för dygnslagring, men väldigt mycket mindre än vad som krävs för säsongslagring och ett helt stängt växthuskoncept. I systemet reduceras vattenförbrukningen så mycket som möjligt då växthuset hålls stängt så lång tid som möjligt och då vatten som kondenserar på kamflänsrören tas om hand och tillförs energilagret, vattentanken där energi lagras (Figur 11). Då systemet inte klarar av att hålla temperaturen och luftfuktigheten tillräckligt låg öppnas dock växthuset och vävarna för ventilation. Växthuset är m.a.o. inte helt stängt. Värme från vattenlagret tillförs växthuset via ett luftvärmesystem med fläktluftvärmare och anslutna perforerade plastslangar. De perforerade slangarna hade en stor diameter (uppskattningsvis ca 60-70 cm) och det angavs att detta skulle underlätta en jämn fördelning av värme från slangarna. För back-up och tillskottsvärme finns konventionell värme kopplad till värmesystemet i anläggningens övriga växthus.



Figur 11. ZINEG-växthuset i Berlin med referensväxthus, kamflänsrör i tak för kylning (avfuktning), varmluftsuppvärmning och värmelagring (Foto: Sven Nimmermark).

I solkollektorsystemet fångade man upp ca 45% av den solvärme som strålade in i huset under de år systemet varit i drift (inga analyserade data fanns för 2012).

I den isolerade tanken som fungerade som värmelager varierade temperaturen under odlingssäsongen från ca 8°C på våren upp till ca 45 °C tidig höst och ner till ca 8-10 °C igen sent på hösten.

De extra vävar som solkollektorväxthuset var utrustat med liksom de extra rör för återvinning som fanns gjorde att solinstrålningen var lägre än i det konventionella växthuset. Intressant var dock att skörden trots detta var högre i solkollektorhuset än i det konventionella. Prof. Schmidt menade att detta troligen berodde på att koldioxiden utnyttjades bättre i detta växthus som hölls mer stängt. Vidare menade han att värmelagret måste ha en relativt stor volym för att kunna ge en god värmelagring och han menade att de volymer som användes i ZINEG-växthuset i Hannover (20 liter per m² växthusyta) var alltför små för att ge god besparing.

Energibesparingsmöjlighet med tillförsel av restvärme i anslutning till växthusets väggar och tak

Att tillföra låggradig restvärme mellan växthusets väggar/tak och en tät väv placerad innanför kan vara ett sätt att spara på värmeenergi som behöver tillföras från en annan energikälla. Överslagsberäkningar gjordes därför med syfte att få en uppfattning om detta (Tabell 5). Beräkningarna har gjorts för växthus av typ Venlo med 6 m höga väggar, med en enkel väv fördragen nattetid i växthuset utan restvärme och med en extra invändig väv i fallet med restvärme i skalet. Vävarna antas vara fördragna nattetid och öppna dagtid.

Beräkningar har gjorts för två olika täckmaterial (enkelglas och dubbelskiktad plast), två olika temperaturnivåer på restvärmen (11-21 °C resp. 16-26 °C) och två olika växthusstorlekar (2000 m² respektive ett försöksväxthus på 200 m²).

Då det i svensk odling av tomat och gurka vanligen är tomt i växthuset under slutet och början av året, då den gamla kulturen tas bort och den nya sätts in, har beräkningar gjorts dels för detta fall och dels för uppvärmning under hela året.

Det framgår av beräkningarna att mängden erforderlig tillsatsvärme varierar stort med alla de ingående variablerna. I ett litet växthus blir energiåtgången per m² stor då vägg- och takytorna är stora i förhållande till golvytan. Enkelglas är ett vanligt täckmaterial i växthus i södra Sverige, men det finns också många växthus med dubbelskiktad plast i väggarna och enkelglas i taket. För enkelglas blir besparingen med restvärme större, men den totala energiåtgången blir naturligtvis större än för ett hus med dubbelskiktad plast.

Tabell 5. I beräkningar uppskattad energi för uppvärmning med och utan tillförsel av restvärme i växthusets väggar och tak

Temp. växthus °C	Energi för uppvärmning (exklusive restvärme)			
	Drift hela året		Drift februari - oktober	
	Utan restvärme	Med restvärme	Utan restvärme	Med restvärme
	<i>kWh m⁻²</i>	<i>kWh m⁻²</i>	<i>kWh m⁻²</i>	<i>kWh m⁻²</i>
Restvärme 11-21 °C, växthus 2000 m ² , täckmaterial av dubbelskiktad plast				
20	312	282	149	137
18	267	212	121	95
16	224	146	95	56
Restvärme 16-26 °C, växthus 2000 m ² , täckmaterial av dubbelskiktad plast				
20	312	120	149	25
18	267	54	121	4
16	224	16	95	3
Restvärme 11-21 °C, växthus 2000 m ² , täckmaterial av enkelglas				
20	654	388	332	180
18	563	301	274	125
16	474	224	217	80
Restvärme 16-26 °C, växthus 2000 m ² , täckmaterial av enkelglas				
20	654	214	332	49
18	563	124	274	27
16	474	47	217	12
FÖRSÖKSVÄXTHUS				
Restvärme 11-21 °C, växthus 200 m ² , täckmaterial av dubbelskiktad plast				
20	619	568	314	292
18	533	438	258	213
16	448	309	204	135
Restvärme 16-26 °C, växthus 200 m ² , täckmaterial av dubbelskiktad plast				
20	619	275	314	91
18	533	149	258	47
16	448	50	204	16
Restvärme 11-21 °C, växthus 200 m ² , täckmaterial av enkelglas				
20	1438	910	786	483
18	1234	713	646	350
16	1036	538	512	239
Restvärme 16-26 °C, växthus 200 m ² , täckmaterial av enkelglas				
20	1438	521	786	180
18	1234	330	646	124
16	1036	132	512	49

Betydelsen av temperaturen på restvärmen är stor. Jämfört med de aktuella temperaturerna för djupvattenintag (ca 11 °C vintertid och 21 °C sommartid) skulle man om restvärmen håller bara 5 °C högre temperatur kunna komma ner avsevärt i behov av tillskottsvärme. Gynnsamt är också om man odlar växter som har god produktion även vid lite lägre temperaturer (t.ex.) 16 °C eller om man nattetid under vissa delar av året kan tolerera dessa temperaturer.

Lämpliga kulturer för lågradiga energisystem

Val av kultur beror på vilken typ av växthus som väljs och var anläggningen ligger geografiskt. Om strävan är en god energihushållning i ett lågradigt energisystem bör användning av spetsenergi under kalla dagar minimeras för att minska användning av t.ex. olje- eller gaspanna som energikälla. Det är då en fördel att välja kulturväxter som har en bra utveckling även vid mindre höga temperaturer.

Traditionella växthuskulturer för matproduktion

Tomat, gurka, paprika och melon är ganska värmekrävande kulturer. Tomat behöver en groningstemperatur på 25-26°C och en odlingstemperatur på 18-20°C, i början av säsongen helst 19-20°C, angiven temperatur är substrattemperatur (SJV, 2008) och man menar att temperaturen inte får understiga 17°C. För gurka rekommenderas en groningstemperatur på 25°C i substratet, efter groning 22°C, vid utplantering rekommenderas 22-23°C i luften och 21°C i substratet (SJV, 2008a). Paprika och chilifrukt behöver en groningstemperatur på 23-28°C och därefter 22-24°C (Plöninge, 2008). Melon växer optimalt vid en temperatur på 21-25°C (Jensen, 2005).



Figur 12. Traditionella växthuskulturer för matproduktion kräver relativt höga temperaturer för att ge god skörd (Foto: Sven Nimmermark).

Tabell 6. Översikt över odlingstemperaturer för olika kulturer aktuella för växthusodling och som diskuteras i texten

Kultur	Optimal lufttemperatur under odling, °C	Kommentar
<i>Chlorella vulgaris</i>	20-30	Effektiv näringsupptagning av t.ex. kväve fördel i kombination med annan växthusodling eller fiskodling
Gröna växter	15-18	Klarar lägre temperaturer vintertid under kortare perioder. 12°C är nedre gräns för bra kvalitet om endast "lagring" av plantorna eftersträvas, t.ex. för försäljning till högre pris
Gurka	22-23	25°C under groningen
Kryddväxter	15-20	20-25°C jordtemperatur under groningen/rotning
Ostronskivling <i>Pluerotus ostreatus</i> (vintersort)	10-17	Behöver temperaturfall till 5-10°C för att fruktifikation ska starta
Paprika och chilifrukt	22-24	23-28°C under groningen
Pensé, primula, engelsk pelargon	15-20	20-25°C jordtemperatur under rotning, klarar temperaturer under 15°C
Shiitakesvamp <i>Lenthus edodes</i>	10-20	20-30°C under inkubation
Tomat	18-20	25-26°C under groningen, absolut krav på odlingstemperatur >16
Trädgårdsmargerit <i>Argyranthemum frutescens hybrida</i>	15-18	Långdagsväxt, 16 timmar dag och 15°C odlingstemperatur ger tidigast skörd vintertid, margeriten kräver temperaturer under 20°C för blominducering. För vinterkultur blir blomningen tidigare med assimilationsbelysning

Prydnadsväxter, bär och kryddväxter

Traditionella växtkulturer såsom tomat och gurka kräver relativt hög temperatur för en god produktion, men det finns andra växthuskulturer som växer och utvecklas väl vid temperaturer under 20°C. Exempel på mindre värmekrävande växthuskulturer som idag odlas i Sverige är olika krukodlade kulturer som engelsk pelargon, penséer, primula, vissa kryddväxter och gröna växter. Gröna växter utvecklas bra vid temperaturer på 15-18°C. Många gröna växter klarar också betydligt lägre temperaturer under kortare perioder utan att skador uppstår (Heijkenskjöld, 1980) även om tillväxten minskar. Ett exempel på grön växt som vill ha och klarar låg temperatur är *Aralia* (*Aralia japonica*) som vintertid behöver ha 15°C och sommartid 21°C (Longman, 1979).

Ett annat exempel på en växt som passar att odla i något svalare klimat är trädgårdsmargerit (*Argyranthemum frutescens hybrida*) som används dels som krukväxt, dels som utplanteringsväxt och dels som snittblomma. Margeriten är en långdagsväxt som utvecklas och blommar bäst genom att exponeras för 16 timmars dag och låg temperatur, gärna 15°C. För denna växt krävs tillskottsbelysning (elenergi) för blominducering då dagslängden understiger 16 timmar i större delen av året i Norden (Adelsköld & Johansson, 1996).

Om en mer extensiv odling föredras kan det vara intressant att t.ex. förlänga säsongen för kulturer som idag odlas på friland genom att odla dem i tunnelväxthus med restvärme som möjliggör en tidig start och snabbare utveckling som kanske även kan ge möjlighet till fler skördar. Tunnelodling är aktuellt för ett antal olika kulturer.

I bärodlingen blir det allt vanligare att förlänga odlingssäsongen för jordgubbar, hallon, blåbär eller andra bär som aronia eller björnbär. Intresset för bärodling har ökat på senare år som en följd av det ökade intresset för produkter med hälsofrämjande ämnen (antioxidanter och vitaminer) vilka bär innehåller mycket av. Restvärmen skulle även kunna möjliggöra odling av kulturer och/eller sorter som annars inte skulle gå att odla på våra breddgrader, tack vare den förlängda säsongen.



Figur 13. Odling av jordgubbar i växthus (Foto: Birgitta Svensson).

Även för plantskoleproduktion och produktion av snittblommor, sommarblommor, perenner och vedartade växter finns möjlighet att förlänga säsongen med låggradig restvärme. Kulturerna kan då få en tidigare start jämfört med om de odlas i tunnlar utan någon

tillskottsvärme och också en ökad odlingssäkerhet som t.ex. minskad risk för frost kan åstadkommas. Ett bland många exempel är möjligheten att odla *Zinnia* (*Zinnia elegans*) som snittblomma. *Zinnia* är en relativ värmekrävande kultur med lång växtsäsong. Genom att odla olika kulturer av snittblommor över året kan en åretruntproduktion skapas (Pålsson, 2012). Ett annat exempel är den sena trädgårdsblåbärssorten Liberty av Northern highbush typ som annars kan ha svårt att hinna ge skörd (Nilsson, 2011).

Sverige importerar mycket plantskoleväxter från främst Danmark, Tyskland och Nederländerna men man skulle kunna odla mer inom landet t.ex. med hjälp av restvärme som kan ge möjlighet till större tillväxt under den svalare årstiden genom ökad temperatur i t.ex. tunnelodling.

Den svenska odlingen av snittblommor är mycket begränsad idag men kan enligt en undersökning av Pålsson (2012) vara en möjlig satsning idag då närproducerade produkter efterfrågas. Odlingen skulle kunna bedrivas i tunnlar för att få nytta av tidig start på säsongen men även i t.ex. kallväxthus. Beroende på arter och sorter varierar klimatkraven. Studier av olika möjliga kulturer för snittblomsodling behöver göras. Framför allt är det förökningen som gynnas av att starta som täckt kultur i tunnel eller kallväxthus men produktkvaliteten hos prydnadsväxterna gynnas av att ha möjlighet att odla i växthus eller tunnel för att undvika "skönhetsfel" som t.ex. fläckar på bladen av regn. Vid odling av lignoser (vedartade växter) ger odling i tunnel möjlighet att förlänga säsongen.



Figur 14. Benved, här *Euonymus hamiltonianus*, är exempel på en vedartad växt som kan odlas som snittblomma (Foto: Tora Pålsson).

Ett sätt att undvika höga toppbelastningar energimässigt är att inte odla helårskulturer. Man kan också tänka sig att ha flera kulturer under året, t.ex. mindre värmekrävande växter på vintern och mer värmekrävande under den varmare delen av året.

Alger

Försök har gjorts med att odla mikroalger, bl.a. *Chlorella vulgaris*, i näringslösning från en annan växthuskultur, i detta fall tomatodling vilket ger intressanta möjligheter att ta tillvara och reducera växtnäringsinnehållet i vattnet, något som är särskilt intressant i de fall inte recirkulerande system finns. Algerna är särskilt intressanta genom att de är en för växthus ny kultur i Sverige. Alger kan odlas med avseende att producera protein, fleromättade fettsyror och karotenoider (Ardal, 2012). De kan också odlas för energiframställning och då som råvara till biodiesel, djurfoder, livsmedel och bioplast. Algerna kan även användas för vattenrening (Fredin, 2009).

Matsvampar

Vissa matsvampar odlas under så låga temperaturer som 10-17°C (Kong, 2004). Exempel är shiitake och ostronskivling som är vanliga matsvampar internationellt. Något att ta i beaktande är att svampproduktionen dock kräver möjlighet till värmebehandling av substrat vilket är en energikrävande process. Svampodling har inte samma krav på ljusstillgången som de gröna växterna men det är viktigt att kunna reglera luftfuktigheten och fuktigheten i substratet för att mycelet inte ska torka ut. Under processen utvecklas värme i substratet som behöver kompenseras med luftning och lufttemperatursänkningar (SJV, 2005).



Figur 15. Svensk odling av Shiitake svamp på halm (Foto: Madeleine Ugglå).

Andra sätt att ta tillvara näring från växtodling i växthus är att kombinera växtodlingen med fiskodling, se nedan.

Fiskodling i kombination med växthusodling

Odling av fisk och skaldjur, akvakultur, förekommer i anslutning till växthus som använder låggradig energi för uppvärmning. Växtodlingen och fisk/skaldjursodlingen kan äga rum i skilda växthus som är förbundna så att näring kan transporteras mellan husen/anläggningarna.

I anläggningen i Vermont intill kärnkraftverket föddes laxfiskar upp i syfte att återetablera fisken i Connecticut-floden. Fisken föddes upp i ett separat fiskhus intill växthusen, se Figur 16 (Olszewski, 1978).

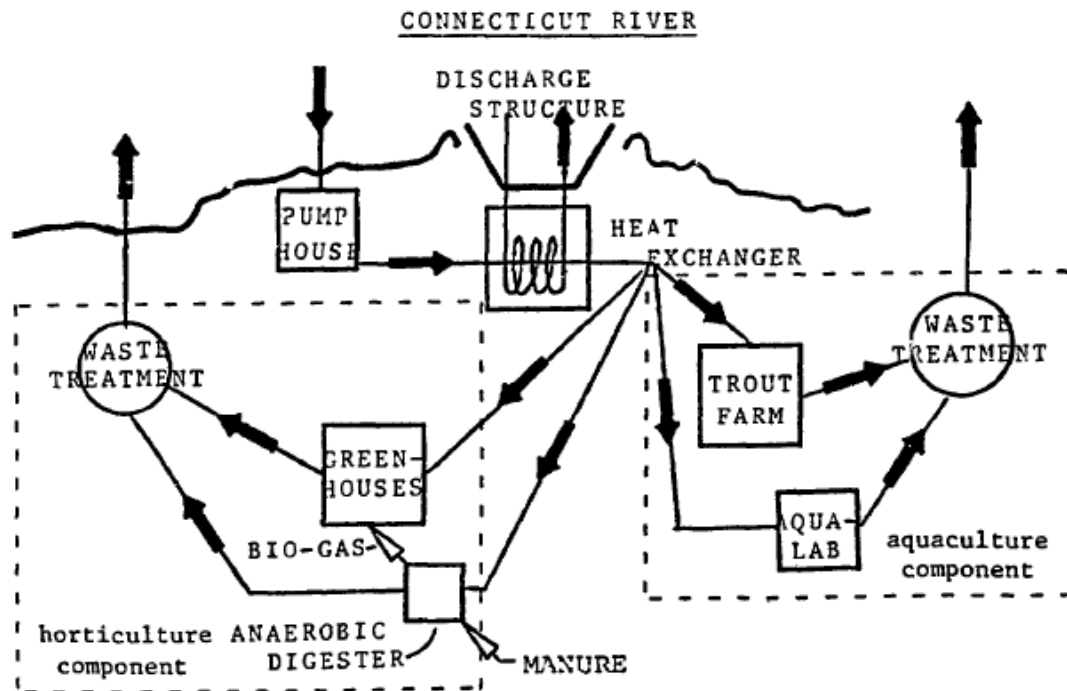


Fig. 8. Sketch of Vermont Yankee waste heat utilization concept.

Figur 16. Översiktsskiss över anläggningen i Vermont (Olszewski, 1978).

Fiskodlingen visade sig vara mer framgångsrik än växtodlingen i anslutning till Vermont kraftverket. Flera kommersiella anläggningar finns idag i USA som utnyttjar restvärme till fiskodling men inga kända växthusanläggningar som använder restvärme (Olszewski, pers. medd. 2012).

Sammanfattande diskussion

Det som är speciellt med den restvärme som kommer från kylning av kraftverket i Oskarshamn och andra liknande anläggningar är att energin är låggradig och finns i ett överflöd som i de flesta fall inte tas tillvara mer än till en bråkdel.

När det gäller användning av den låggradiga energin i växthussammanhang kan den dels användas med de aktuella temperaturerna som kommer från kylningen av verket eller växlas upp till högre temperaturer.

Vid uppväxlingen åtgår dock energi. Användning av system med värmepumpar är dock attraktiva för utnyttjande av restvärme då värmefaktorn (COP) blir betydligt bättre för restvärme jämfört med system där värmen utvinns från uteluft, bergvärme eller grundvattenvärme. För att få en bra uppfattning om lönsamheten i uppgradering alternativt möjligheterna att använda den låggradiga värmen direkt behövs beräkningar, både tekniska och ekonomiska, grundade på den aktuella situationen för att bedöma de olika alternativen. Förutom beräkningar krävs också försök då systemen är komplexa och korrekta beräkningar svåra att åstadkomma. Vad som passar bäst i situationen beror t.ex. på val av växtkulturer, om produktionen ska pågå hela året och närheten till spillvärmen dvs. hur långt värmen behöver transporteras.

För att skapa ett hållbart energisystem behövs en kombination av restvärme som energikälla med dels kompletterande värmekällor och dels olika kompletterande lösningar som ökar effektiviteten i energianvändningen. Målet är att visa på energihushållande lösningar som på olika sätt kan minska energianvändningen.

Jämförande underlag behöver tas fram för att skapa beslutsunderlag för vilken kompletterande värmekälla som passar restvärmeanvändning under svenska förhållanden och dagens situation. Sedan 1980-talet har nya tekniska lösningar framkommit, kostnaderna för energi inom växthusproduktionen har åter ökat samtidigt som kraven på miljöanpassning också ökat.

När det gäller konkreta lösningar att tillvarata den låggradiga värmen kan den t.ex. tillföras i en luftspalt mellan täckmaterial och vävar i tak och väggar för att på så sätt fungera som ett isolerande skikt. I stället för enkelglas, som är det vanliga täckmaterialet i växthustak på våra breddgrader för att så mycket strålning som möjligt ska komma in i växthuset, kan man använda sig av ett dubbelt skikt av plast. Vid den typen av åtgärder behöver hänsyn tas till hur instrålningen påverkas. Aberkani *et al.* (2010) anger en ljusgenomsläpplighet på 73% för den dubbelplast som används i de kanadensiska växthusen att jämföra med enkelglas som låter 90% passera. Dock har nya flerskiktade material med bättre ljustransmission utvecklats på senare år. De låga restvärmetemperaturer som finns vid kärnkraftverket i Oskarshamn innebär begränsade möjligheter för att erhålla ett bra utnyttjande i ett sådant system om ett växthus skall värmas till 20°C. Om man i odlingen kan acceptera lägre temperaturer, t.ex. 16°C eller om restvärmen håller en lite högre temperatur kan betydande besparing åstadkommas med restvärme som tillförs i "växthusskalet".

Genom att välja en dynamisk klimatstyrning, dvs. med temperaturintegration som tillåter att klimatet varierar inom ett visst temperaturområde som gynnar den odlade kulturväxten, är det lättare att tillåta lägre temperaturer vissa dagar, förutsatt att de ligger ovanför den för kulturen kritiska. På det sättet kan energi sparas.

De värmelösningar som finns idag för växthus bygger ofta på att en olje- eller gaspanna finns som kan användas vid toppar i värmeenergiebehovet under kalla vinterdagar. Önskvärt är att finna andra, förnyelsebara lösningar även för toppbelastningar. En lösning skulle kunna vara att ta ut högre temperaturer från t.ex. kraftvärmeverk via ett fjärrvärmenät.

Kompletterande lösningar för att minska energibehovet kan vara bättre sätt att isolera växthuset utan att instrålningen påverkas negativt eller i ringa omfattning, lagra solenergi eller annan energi på olika sätt för att öka kylvattnets temperatur eller vattenlagrets temperatur.

Val av kulturväxt inverkar på vilka krav som ställs på klimatet. En lösning kan vara att välja kulturer som är mindre ljus- och temperaturkrävande.

En intressant användning av restvärmeenergin är i mer extensiv odling, som odling i tunnlar och kallhus utan den avancerade klimatstyrning som finns i vanliga växthus. I dessa odlas idag säsongsbetonat och under den kallaste perioden står tunnarna tomma. Detta gör att ett system för att klara toppbelastningar inte behövs eller kan dimensioneras för betydligt lägre kapacitet. Användning av restvärme gör att det går att starta tidigare på säsongen och även förlänga säsongen för att kunna ta fler skördar av bär eller andra produkter. Värmen kan dels tillföras via ett lager, i jorden eller i luften.

Marknadsundersökningar för jordgubbar visar att det finns ett intresse hos svenska konsumenter att köpa jordgubbar under en längre säsong (Axelson *et al.*, 2009). Även andra trädgårdsprodukter lämpar sig för odling i tunnlar, t.ex. andra bär som blåbär och hallon men även snittblommor.

Viktigt för att odlingsföretag ska våga satsa på restvärme till växthusuppvärmning är att känna till de ekonomiska förutsättningarna. Beräkning av driftskostnader och investeringskostnader behövs för att få en uppfattning om hållbarheten genom en långsiktig kalkyl så att den kan jämföras med andra energilösningar.

I en avhandling av David Burch (Burch, 1985) inriktad på att undersöka de ekonomiska förutsättningarna för att använda restvärme till växthusuppvärmning föreslås att den möjliga användningen av restvärme kan analyseras i fyra steg:

1. Val av back-up system. Vilket uppvärmningssystem passar i den aktuella situationen som back-up-system för att komplettera restvärmen med tanke på variationer i tillgång och värmebehov? Vilken dimensionering ger den minsta uppvärmningskostnaden på lång sikt med hänsyn till både drifts- och investeringskostnader?
2. Jämförelse med andra system. Hur stor är vinsten jämfört med andra alternativa värmesystem, t.ex. fossila bränslen, biogas eller andra biobränslen?
3. Göra en skattning av pumpningskostnaderna mellan kraftverk och växthusanläggning
4. Slutvärdering. Med hänsyn till den information om kostnader och vinster som framkommit: är en uppvärmning baserad på restvärme genomförbar och att föredra i det aktuella fallet?

Diskussion behövs kring prissättning av restvärmen. Beroende på vem som äger värmeväxlarutrustningen och erbjuder varmvattnet till växthusföretaget kan olika situationer uppstå. Om kraftverket själva äger hela systemet fram till odlingen: vad vill de ha ersättning för? Vad är ett rimligt pris på den låggradiga energin?

En viktig fråga är även långsiktigheten i kontraktstid. Initialt kan det innebära större investeringskostnader för ett system byggt på restvärme eftersom det bör finnas ett back-up-

system som kan användas i händelse av stillestånd vid kraftverket och som även kan ta toppbelastningar om inte kraftverket erbjuder tillgång till även varmare vatten eller vattenånga för det ändamålet. För att satsa på att t.ex. bygga ett växthus behöver kontraktstiden vara minst 20 år eller hellre 30 år för att företaget ska kunna räkna investeringen som långsiktig och därmed hållbar att göra.

Sammanfattningsvis så finns stor potential i att kunna använda restvärme för uppvärmning i täckt odling som kan vara växthus, tunnlar eller plasttäckt jord. Andra kulturer än de traditionella kan bli möjliga att odla, tack vare en tidigareläggning av säsongsstart och förlängning av säsongen och för konventionella växthus kan företagen få tillgång till ett överflöd av billig energi om den tas tillvara på ett bra sätt. Tekniskt kan utveckling av olika flexibla isolerlösningar öka användningsmöjligheterna för låggradig värme som kan användas som strömmande isolerskikt i täckmaterial i kombination med lagring av värme i mark, stensbäddar eller andra energilagerlösningar.

Det går att bygga vidare på tidigare studier av låggradig värme till tunnelodling på Alnarp och förutom uppvärmning av mark studera möjligheter till att t.ex. värma luften i tunneln med olika lösningar t.ex. för att minska frostrisk på våren och hösten.

Man kan på sikt tänka sig ett kluster av företag intill kraftverk som erbjuder restvärme under förutsättning att det finns tillgänglig odlingsmark i området. Företagen kan använda restvärmen till växthusodling, i flexibla tunnlar och till andra täckta odlingar. Många olika kulturer är möjliga att odla. Intressanta val är t.ex. återetablering av snittblomsodling i Sverige, odling av alger för olika ändamål och produktion av olika bär för lokal marknad.

Slutsatser

Följande slutsatser kan dras av den studie som gjorts:

- Då det gäller lågenergiteknik och utnyttjande av låggradig värme i växthusodling finns en rad obesvarade frågor avseende teknik och system
- Traditionellt har växthus i Sverige värmts med hjälp av högtempererad rörvärme dimensionerad för framlednings-/returtemperaturer av storleksordningen 80/60°C och det finns behov av utveckling av teknik för luftvärmesystem och andra värmesystem med möjlighet för utnyttjande av låggradig värme
- För låggradig restvärme som finns i överskott kan tillförsel av restvärme i växthusets skal vara en ny möjlig teknik som kan utvecklas
- Täckmaterial för växthus behöver ha god ljustransmission och täckmaterial som är kommersiellt tillgängliga idag har till följd av detta krav en hög värmegenomgångskoefficient. Det finns ett behov av utveckling av nya material med goda ljus- och värmeisolerande egenskaper
- Odlingssystem behöver obeprövade system med ny teknik testas då bl.a. fuktförhållande och andra klimatförhållanden kan påverka odlingsresultat och sjukdomsangrepp
- Lågtempererad restvärme kan utnyttjas för traditionella växthuskulturer, men om temperaturnivån är låg kan andra kulturer såsom bär och svamp som kräver lägre temperaturer och traditionellt odlas i andra odlingssystem vara intressantare
- Fiskodling i anslutning till växthus och med utnyttjande av restvärme är intressant för studier av möjligheterna till utnyttjande av näringsämnen från fiskodlingen i hydroponiska system.

I en forskningsanläggning enligt följande avsnitt med försöksväxthus och fiskodling skulle en del av de ovan nämnda frågeställningarna kunna studeras.

Förslag på utformning av forskningsväxthus

Målet med det tänkta växthuset är att hitta en teknisk utformning där mycket låga temperaturer på värmevatten kan utnyttjas så långt som möjligt för att värma en växthusodling. Detta leder till andra konstruktioner än den idag konventionella utformningen och de idag konventionella installationerna.

Förutsättningar:

- Djupvattenintag med ca 0°C ingående temperatur på kylvattnet vintertid och ca 10°C sommartid och 11 °C temperaturhöjning, dvs. utgående kylvatten från kärnkraftverket håller en temperatur på ca 11 °C som lägst och ca 21°C som högst.
- Efter värmeväxling till en krets som kan värmeförsörja ett växthus erhålls ett värmevatten med en temperatur som varierar mellan ca 9-10 och 19-21°C beroende på årstid.
- Dessa temperaturer kan inte utan någon form av övrigt energitillskott t.ex. med hjälp av solvärme, värmepump eller någon övrig konventionell värmekälla värma ett växthus för produktion av konventionella ätbara växthusprodukter med bibehållen hög konventionell produktionshastighet.
- För att kunna utnyttja så mycket energi som möjligt från restvärmen krävs okonventionella lösningar.

Tänkt växthuskonstruktion och installationer

För utveckling och forskning avseende växthus för utnyttjande av lågtempererad restvärme och studier av hydroponiska system för integrerad kretsloppsanpassad fiskodling föreslås följande:

- Venlo block med en yta på förslagsvis ca 200 m²
- Täckmaterial av relativt sett välisolerat material och god ljusgenomsläpplighet
 - o Förslag Lexan ZigZag med två skikt, U-värde på ca 2,7 W m⁻² °C⁻¹ och en ljusgenomsläpplighet likvärdig med glas (91% ljustransmission).
- Tät energiväv placerad på distans till väggar och horisontellt i taket med god distans till täckmaterialet
- Skuggväv för avskärmning av solljus vid för stark solinstrålning
- Uppvärmning av utrymmet mellan täckmaterialet och energiväven med typ fläktkonvektorer där konvektorbatterier genomblåses med luft för maximal värmeöverföring. Dessa placeras vid golv och beroende på dimensionering placeras sådana även vid takfoten. Värmevattnet i fläktkonvektorerna utgörs av restvärme med

den temperatur som kan åstadkommas vid aktuell årstid (*skalvärmen reducerar behovet av värme innanför energiväven*)

- Uppvärmning i själva växthuset (innanför vävarna) med ett luftvärmesystem med perforerade plastslangar som dimensioneras som ett relativt extremt lågtemperaturvärmesystem (*40°C fram/30°C retur är t.ex. möjligt vid dimensionerande lägsta utetemperatur och kallare i övriga fall*).
- Dygnslagring av solvärme för utnyttjande i värmesystemet för själva växthuset. Kollektorsystem för solvärme i växthusets övre del
- För reservvärme och supplementvärme kan el användas i försöken (*en elpanna är enkel och billig att införskaffa*)
- Dynamisk temperaturstyrning i växthuset där temperaturen tillåts gå ner nattetid och kompenseras med högre temperatur dagtid
- Hydroponiskt system i växthuset där näringslösning cirkulerar mellan fiskodlingen och växtodlingen. Systemet förses med reningssystem i erforderlig mån
- En traditionell växthusgröda t.ex. tomater kan produceras, men också annan odling är tänkbar.

Planen nedanför Oskarshamns reaktor 3 kan vara en lämplig placering av en försöksanläggning.

Litteratur

- Aberkani, K., Hao, X., de Halleux, D., Dorais, M., Vineberg, S. & Gosselin, A. 2010. Effects of shading using a retractable liquid foam technology on greenhouse and plant microclimates. *Hort Technology*, 20(2), 283-291.
- Aberkani, K., Hao, X., de Halleux, D., Papadopoulos, A.P., Dorais, M., Vineberg, S. & Gosselin, A. 2011. Energy saving achieved by retractable liquid foam between double polyethylene films covering greenhouses. *Transactions of the ASABE*, Vol. 54(1), 275-284.
- Adelsköld, N. & Johansson, J. 1996. *Trädgårdsmargerit till snitt. Enkel blomma med många krav*. Faktablad Trädgård, 1996. Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala.
- Ardal, E. 2012. *Odling av mikroalger inom trädgårdsnäringen - Kan mikroalger som producerar kommersiellt intressanta ämnen tillväxa i använd näringslösning från växthusodling? Självständigt arbete Hortonomprogrammet*. Sveriges lantbruksuniversitet, Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap, Område Hortikultur, Alnarp.
- ATL 2009. Flisen värmer tulpanerna. *ATL Lantbrukets Affärstidning*, 2009-11-14
- Axelson, M., Ekelund, L. & Tjärnemo, H. 2009. *Konsumenter om jordgubbar - En undersökning av 400 konsumenters preferenser och köp*. LTJ-Fakultetens rapportserie. Rapport, 2009:16. Sveriges lantbruksuniversitet, Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap, Tillväxt trädgård, Alnarp.
- Buclon, F. 1975. Heating of greenhouses using plastic ducts on the ground. *Plasticulture*, 27, 33-37.
- Burch, D.W. 1985. *Systems approach to financial appraisal of greenhouse heating with power plant cooling water*. Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Christensen, I. & Larsson, G. 2010. *Energianvändningen i Trädgårdsnäringen*. Grön Kompetens AB, Alnarp.
- Christensson, H. 1988. *Ljus och belysning i växthus*. Konsulentavdelningens rapporter, Trädgård 345. Sveriges Lantbruksuniversitet, Alnarp.
- Elwell, D.L. & Short, T.H. 1989. Control of electrostatic effects in a polystyrene pellet variable shading greenhouse glazing. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 2117-2122.
- Energimyndigheten 2012. *Vindkraftsstatistik 2011*. ES 2012:2. Statens Energimyndighet, Eskilstuna.
- Enshayan, K. & Short, T.H. 1986. Flow Characteristics of Polystyrene Pellets Used for Greenhouse Insulation. *Transactions of the ASAE*, 29(5), 1427-1433.
- Fredin, M. 2009. *Alger som energikälla - en svensk möjlighet?* Examensarbete Kemiteknik. Tekniska högskolan, Högskolan Jönköping.
- GE Plastics 2012. *Lexan* ZigZag** Bergen op Zoom, The Netherlands, <http://www.ampelite.com.au/images/LZZ%20Flyer%20English.pdf>.
- Geotec. 2008. Utan geoenergi hade vi fått stänga butiken. Utan geoenergi hade vi fått stänga butiken. *Bilaga Dagens Industri April 2008*,
- Gustavsson, G. & Åström, P. 1986. *Rörlig isolering i växthus : Movable thermal screen in greenhouse*. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik (LBT), Lund.
- Heijkenskjöld, N. 1980. *Gröna växter vid låg temperatur och låg ljusintensitet*. Rödbäcksdalen meddelar, Rapport Trädgård, 1980:3. Norrlands lantbruksförsöksanstalt, Rödbäcksdalen, Umeå.
- Håkansson, B., Börjesson, L., Sakshaug, K. & Magnusson, G. 1984. *Spillvärme för odling av trädgårdsväxter : Waste heat for growing horticultural crops*. Rapport 42. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik (LBT), Lund.

- Jensen, K. 2005. *Ekologisk odling av melon*. Ekologisk trädgårdsodling, Information. Länsstyrelsen Västra Götalands län, Landsbygdsenheten, Skara.
- Kong, W.-S. 2004. *Oyster Mushrooms, Chapter 4 Spawn*. In: Descriptions of commercially important *Pleurotus* species. I: Mushroom Growers' handbook, Part II, 54-61.
- Kuack, D.L. 1986. Shading techniques utilize the unusual. *Greenhouse Grower (May)*, 29-30.
- Landgren, B. 1984. *Täckningsmaterial till växthus*. Fakta teknik, nr 7. Sveriges Lantbruksuniversitet, Konsulentavdelningen, Uppsala.
- Lantz, M., Larsson, G. & Hansson, T. 2006. *Förutsättningar för förnybar energi i svensk växthusodling*. Rapport 2006:57. Institutionen för teknik och samhälle, Lunds tekniska högskola, Lund.
- Lindström, A. 2007. Plantodling från grunden, lektion 1: temperatur och ljus. *PlantAktuellt (utgiven av Högskolan Dalarna, SLU & SKOGFORSK)*, 2007:1, 8-10.
- Longman, D. 1979. *Att lyckas med krukväxter*. Natur & Kultur, Stockholm.
- Madewell, C.E., Kind, L.D., J., C., Martin, J.B. & Furlong, W.K. 1975. *Using power plant discharge water in greenhouse vegetable production*. TVA progress report: Bulletin Z-56. Tennessee Valley Authority, National Fertilizer Development Center, Knoxville, TN, USA.
- Myrsten, A. 2010. Energiskatt tvingar fram kostsam konvertering. Energiskatt tvingar fram kostsam konvertering. *Viola* 2010:10 Oktober, 34-35.
- Möller Nielsen, J. 2008. *Energien & koldioxiden i svensk växthusodling 2008*. Rapport 2. Cascada AB, Varberg.
- Möller Nielsen, J. 2009. *Energien i svensk växthusgrönsaksodling 2009*. Rapport 4. Cascada AB, Varberg.
- Neova AB 2011. *Fakta om Energiskiftet 2011*. Neova AB, Hudiksvall.
<http://www.energiskiftet.se/press/fakta-om-energiskiftet-2011-fran-olja-till-bioenergi-i-industrin>.
- Nilsson, T. 2011. *Odling av blåbär*. LTJ fakultetens faktablad 2011:11. Fakta från Tillväxt Trädgård, SLU Alnarp.
- Nimmermark, S. 1992. *Växhusteknik med anpassning för Norrland (Greenhouse techniques adapted to Norrland)*. Specialmeddelande, 195. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik, LBT, Lund.
- Olszewski, M. 1978. Use of waste heat from nuclear power plants. In: *DO Environmental Control Symposium, November 14-16, 1978*, Washington DC, pp18.
- Olszewski, M. 2012. Personligt meddelande 2012-12-27.
- Ottosen, C.-O. & Rosenqvist, E. 2004. Dynamisk klimatstyrning spar energi och ökar skörd i gurkodling. *Viola*, 109(4), 12-13.
- Paksoy, H., Snijders, A. & Stiles, L. 2008. State-of-the-Art Review of Aquifer Thermal Energy Storage Systems for Heating and Cooling Buildings.
http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/effstock09/Session_6_3_ATES_Applications/53.pdf,
- Plöninge, P. 2008. *Ekologisk odling av paprika och chilipeppar*. Kurspärm Ekologisk odling i växthus. Jordbruksverket, Jönköping.
- Pålsson, T. 2012. *Svenska frilandsodlade snittblommor: en värdig konkurrent till import?* Examensarbete Hortikultur. Självständigt arbete grundnivå, Trädgårdsingenjörsprogrammet. Sveriges lantbruksuniversitet, Fakulteten för landskapsplanering, trädgårds- och jordbruksvetenskap, Område Hortikultur, Alnarp.

- Rousse, D.R., Martin, D.Y., Thériault, R., Léveillé, F. & Boily, R. 2000. Heat recovery in greenhouses: a practical solution. *Applied Thermal Engineering*, 20(8), 687-706.
- Schüssler, H.K. & Bergstrand, K.-J. 2009. *Lysdioder - framtidens växthusbelysning?* Fakta från Tillväxt Trädgård, Info nr 7 - 2009. Sveriges lantbruksuniversitet, LTJ-fakulteten, Alnarp.
- SJV 2005. *Ekologisk odling av ostronskivling*. Jordbruksinformation 10. Statens Jordbruksverk Jönköping.
- SJV 2007a. *Ekologisk odling av tomat*. Jordbruksinformation, 2007:20. Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV 2007b. *Växthusteknik*. Kurspärm Ekologisk odling i växthus, Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV 2008a. *Ekologisk odling av växthusgurka*. Kurspärm Ekologisk odling i växthus, Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV 2008b. *Ekologisk odling i kruka*. Kurspärm Jordbruksverket 2008, Ekologisk odling i växthus. Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV 2008 *Ekologisk odling av tomat*. Kurspärm Ekologisk odling i växthus. Jordbruksinformation 20-2007. Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV 2010. *Energianvändning i växthus 2008*. Statistik från Jordbruksverket, Statistikrapport 2010:1. Jordbruksverket, Jönköping.
- SJV 2012a. *Energianvändning i växthus 2011*. Statistik från Jordbruksverket, Statistikrapport 2012:05. Statens Jordbruksverk, Jönköping.
- SJV 2012b. *Trädgårdsproduktion 2011*. Sveriges officiella statistik, Statistiska meddelanden JO 33 SM 1201, korrigerad version 2012-09-03. Jordbruksverket, Jönköping.
- Sonneveld, P.J. & Swinkels, G. 2005. *New developments of energy-saving greenhouses with a high light transmittance*. In: Proceedings of the International Conference on Sustainable Greenhouse Systems, Vols 1 and 2, 589-595.
- Tantau, H.J. 1976. *Doppelbedachungen, Wärmeverbrauch- Klima- Lichtdurchlässigkeit*. Gartenbautechnische Information, Heft 5. Institut für Technik in Gartenbau und Landwirtschaft, Hannover.
- Tantau, H.J. Meyer, J., Schmidt, U. & Bessler, B. 2009. Low energy Greenhouse - a System Approach. In: *Greensys 2009: Proceedings ISHS on High Technology for Greenhouse Systems, Acta Horticulturae 893*, 75-84.
- Tarkiainen, T. 1986. *Uppvärmning av växthus*. Examensarbete, 59. Sveriges Lantbruksuniversitet, Inst for lantbrukets byggnadsteknik, LBT Lund.
- Turgut, B., Dasgan, H.Y., Abak, K., Paksoy, H., Evliya, H. & Bozdag, S. 2009. Aquifer Thermal Energy Storage Application in Greenhouse Climatization. *International Symposium on Strategies Towards Sustainability of Protected Cultivation in Mild Winter Climate, Acta Horticulturae 807*, 143-148.
- Walker, J.N. & Duncan, G.A. 1978. Engineering Considerations of Energy Problems in Protected Cultivation. *Energy in Protected Cultivation, Acta Horticulturae 76*, 67-75.
- Wigström, P. 1992. *Åldringstester på täckningsmaterial till växthus*. Specialmeddelande 193. Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik, LBT, Lund.
- Villeneuve, J., de Halleux, D., Gosselin, A. & Amar, D. 2005. Concept of Dynamic Liquid Foam Insulation for Greenhouse Insulation and the Assessment of Its Energy Consumption and Agronomic Performances. In: *Acta Hort. ISHS 2005, Proc. IC on Greensys* (eds. G.v. Straten & e. al.), 1-6.